АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СОБРАНИЕ ТРУДОВ АКАДЕМИКА А.Н.КРЫЛОВА

IX

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СОБРАНИЕ ТРУДОВ

АКАДЕМИКА

А. Н. КРЫЛОВА

IX

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1949 ЛЕНИНГРАД

Ответственные редакторы

Академик В. И. СМИРНОВ

Чл.-корр. АН СССР Ю. А. ШИМАНСКИЙ

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

От Комиссии по изданию полного собрания трудов академика А. Н. Крылова . 5

О преподавании теории корабля 7

Теория корабля 13
Введение 13
1. Основные проблемы теории корабля в их историческом развитии 14
2. Плавучесть корабля 18
3. Остойчивость корабля 21
4. Качка корабля 27
   a. Введение 27
   b. Свободные колебания (корабль на тихой воде) 29
   c. Учет сопротивления воды 32
   d. Вынужденные колебания (корабль на волнении). Теория боковой качки Фруда 35
   e. Теория килевой качки А. Н. Крылова 36
   f. Общая теория колебаний корабля на волнах 40
   g. Приборы для регистрации качки корабля 46
5. Поворотливость корабля. Циркуляция 48
6. Вибрация корабля 49
Литература 53

Новый метод расчета элементов подводной части судна 55
Приложение 1-е 83
Приложение 2-е 91

По поводу статьи „Новые формулы для нахождения статических моментов и моментов инерции площадей“ 103

О прогрессивных испытаниях кораблей 110

Влияние глубины моря на результаты испытаний миноносца „Быстрый“ . . 119

Коэффициенты Фруда для вычисления сопротивления от трения 127

Некоторые замечания об обработке прогрессивных испытаний судов 132

О вычислении линейного ускорения корабля при изменении скорости хода . 144

Технические соображения о буксировке судов 149
1. Основные данные о тросах и цепях 149
2. Свойства цепной линии 151
3. Натяжение буксира при разных случаях буксировки 151
4. Составление таблиц элементов цепных линий 154

Стр.

5. Влияние груза, привешенного к буксиру 157
6. Буксиры цепные 161

Метод решения одной задачи 162

Наблюдения над крепостью льда и сопротивлением его движению ледокола „Ермак“ 165

О равновесии шаровой мины на течении 183

Поверительные расчеты по постановке кессона моста им. Володарского . . . 203
1. Термины, относящиеся к тросам и цепям 203
2. Крепость тросов и цепей 204
3. Результаты осмотра подготовленного к постановке кессона 207
4. Общие расчетные формулы. Распределение усилий; потенциальная энергия системы буксиров и якорных канатов 210
5. Учет главнейших случаев поглощения кинетической энергии 222
6. Обеспечение маневров при постановке кессона на место 226

Суда, перевозившие паровозы 229
Приложение 1-е. Силы, действующие на паровоз при качке корабля 253
Приложение 2-е. Расчет подкреплений палубы в районе люков 269
Приложение 3-е. Вычисление водоизмещения и остойчивости парохода „Нибинг“. 271

Картина гибели 6. линейного корабля „Имп. Мария“ 276

Соображения о подъеме линейного корабля „Имп. Мария“ 284

О проекте стандарта таблиц непотопляемости 290
Приложение. Принципы обеспечения непотопляемости военных судов 296

Рецензии на книгу „Théorie du Navire“ 299
Рецензия на том I 299
Рецензия на том II 303
Рецензия на том III 310

ОТ КОМИССИИ ПО ИЗДАНИЮ ПОЛНОГО СОБРАНИЯ ТРУДОВ АКАДЕМИКА А. Н. КРЫЛОВА

Наряду с широко известными работами Алексея Николаевича в области теории корабля, вторая часть IX тома содержит несколько впервые публикуемых рукописей, к которым относятся: отзыв „О проекте стандарта таблиц непотопляемости", статьи „О вычислении линейного ускорения корабля при изменении скорости хода", „Технические соображения о буксировке судов", а также рецензия на третий том книги Поллара и Дюдебу „Théorie du Navire". Кроме того, в настоящую книгу включены переводы двух статей А. Н. Крылова, одна из которых напечатана в немецкой математической энциклопедии, а вторая — в „Bulletin de l'Association technique maritime". Ряд публикуемых работ, как, например, глава „Суда, перевозившие паровозы", а также статьи „О равновесии шаровой мины на течении" и „Наблюдения над крепостью льда и сопротивлением его движению ледокола «Ермак»", стали библиографической редкостью, сохраняя попрежнему исключительную научную и практическую ценность.

Часть вторая IX тома заключает собой труды академика А. Н. Крылова по теории корабля, за исключением работ Алексея Николаевича в области качки корабля, выделенных особо в XI том.

О ПРЕПОДАВАНИИ ТЕОРИИ КОРАБЛЯ[1]

Вступительное слово на конференции преподавателей теории корабля в январе 1941 г.

§ 1. Знаменитому Пуассону приписывают слова: „Математика хороша для двух назначений, — чтобы ею заниматься и чтобы ее преподавать".

Пуассон следовал своим словам: им написано около 450 ученых статей по самым разнообразным вопросам математики, механики, математической физики и, кроме того, ряд отдельных, обширных сочинений, которые могли служить руководствами к читаемым им курсам, как то: „Механика", в двух томах, „Теория капиллярных явлений", „Аналитическая теория тепла" и „Теория вероятностей в приложении к судебным постановлениям в делах уголовных и гражданских".

Спрашивается: в теории корабля надо ли видеть удобную для развития и преподавания отрасль математики или нечто иное, именно изучение мореходных качеств корабля и теоретическую базу кораблестроения. Ответ очевиден.

§ 2. Основоположником теории корабля был величайший из математиков всех времен и народов и величайший практический механик и изобретатель своего времени Архимед.

Двадцать два столетия тому назад он дал свой закон о равновесии тел, плавающих в воде, и основал учение о плавучести и остойчивости. Но этот основной закон оставался без приложения до 1660-х годов, т. е. около 1900 лет, когда главный строитель английского флота Антоний Дин применил учение Архимеда о плавучести к практике кораблестроения. Учения об остойчивости корабля тогда не существовало, ибо Архимед в своем сочинении ограничился рассмотрением шаровых сегментов и отрезков параболоидов вращения.

Прошло еще 80 лет, в течение которых, в 1686 г., вышли в свет „Начала" Ньютона, развилось созданное им и, независимо от него, Лейбницем исчисление или анализ бесконечно-малых, и вот, примерно

---

[1] Впервые напечатано в журнале „Судостроение" (1941, № 4).

200 лет тому назад, появились почти одновременно два сочинения: 1) астронома и геодезиста Бугера, который в течение 10 лет, с 1735 г., производил измерение длины дуги меридиана близ экватора в тогдашнем Перу, под заглавием „Traité du Navire“ и 2) сочинение Леонарда Эйлера, бывшего тогда в Петербурге и затем в Берлине, изданное нашей Академией Наук под заглавием „Scientia Navalis“ — „Корабельная наука“.

Великий Эйлер творил во всех областях не только науки, но и техники, создавая и развивая одновременно как математику, так и ее приложения. Благодаря трудам братьев Бернулли и самого Эйлера анализ бесконечно-малых получил широкое развитие и распространение. Эйлер приложил его к механике, издав в 1736 г. свою двухтомную „Механику, аналитически изложенную“.

Теория корабля давала обширное поле для разностороннего применения анализа и после издания упомянутых двух основных сочинений быстро развилась, но, тем не менее, долгое время оставалась без непосредственных приложений к практике кораблестроения. Это происходило по двум главным причинам:

1) Инженерно-техническое образование в то время было весьма мало распространено и ограничивалось архитектурою и военно-инженерным делом. Кораблестроение считалось полутаинственным *искусством*, передававшимся от отца к сыну и от мастера к ученику, а не *наукою*, не имеющей тайн и доступной всем и каждому.

2) Семидесятипятилетие, от 1750 до 1825 г., было изумительно по развитию математических наук. Эти 75 лет охватывают таких гениев, как Эйлер, Лагранж, Лаплас, Монж, Пуассон, Фурье, а также Гаусса и Коши в самый расцвет их деятельности. Но инженер-практик, с юных лет выросший на верфи, не имел надлежащей подготовки, чтобы применять эти методы к теории корабля. Ни в руководстве Бугера, ни в руководстве Эйлера инженер не находил прямых указаний, не находил того *показа*, которым лучше всякого *рассказа* выясняется, каким образом надо поступать в определенных конкретных случаях, он не находил также взятых из практики примеров, не находил ни расчетных схем, ни образцов численных вычислений.

С другой же стороны, ему предписывалось руководствоваться утвержденным „штатным положением“, в котором для двух- и трехдечных кораблей всех рангов, фрегатов и корветов указывались размеры не только всех частей корпуса, но и оснастки, т. е. начиная от киля и кончая бом-кливер-ниралом, а также табели всех предметов снабжения корабля, вроде теперешних правил „Регистра“ или „Ллойда“ для коммерческих судов. Ясно, что практику-кораблестроителю надо было обращаться к этим обязательным „штатным положениям“, а не разбираться в творениях Лагранжа или Пуассона.

Но вот, 100 лет тому назад, стали строить железные пароходы, для них „штатных положений“ не было, пришлось перейти к творческому проектированию, а вместе с ним и к пользованию первоисточниками.

§ 3. Возьмем для примера любой современный курс теории корабля. Все учение о плавучести и остойчивости сводится к вычислениям разного рода „элементов" по приближенным формулам квадратур.

Этот вопрос находится в теснейшей связи с методами интерполяции, которые были установлены Ньютоном в его „Началах", изданных в 1686 г., затем развиты Котесом, подготовлявшим в 1713 г. второе издание „Начал". Затем эти правила были развиты Эйлером, Лапласом, Гауссом, Якоби и Чебышевым; все они, и даже Эйлер, были далеки от практики кораблестроения.

Если мы от статики корабля перейдем к его динамике, то мы шага не сможем ступить без Эйлера, создавшего учение о движении твердого тела, но не для „Scientia Navalis", а для астрономии и теории прецессии или предварения равноденствий. Не сможем мы обойтись и без Лагранжа, научившего составлять уравнения движения любой системы в любых координатах. Но после того, как составлены дифференциальные уравнения движения, надо их интегрировать точно или приближенно.

Здесь опять на первый план выступает Эйлер с его четырьмя томами „Institutiones Calculi Integralis" и его „Theoria Lunae novo methodo pertractata". Вместе с ним идет Лагранж с его общей теорией малых колебаний и методой изменения произвольных постоянных, Лаплас с его методою разложения в ряды по степеням малых постоянных параметров, входящих в уравнение, с разысканием „малых делителей" и „вековых неравенств".[1]

Сюда же надо отнести и американского астронома Хилля с его теорией движения лунного перигея.[2] Надо будет обратиться к Пуассону и его

[1] Исключительное значение для развития физико-математических наук имеют труды знаменитого математика и механика Михаила Васильевича Остроградского (1801—1862), являющегося одним из основоположников русской математической школы. Его работы по аналитической механике охватывают самые разнообразные вопросы этой науки: теорию притяжения, колебания упругого тела, гидростатику и гидродинамику, общую теорию удара и т. д. М. В. Остроградскому принадлежит честь установления одного из важнейших законов механики — принципа наименьшего действия. Его фундаментальный труд „Об изопериметрах" содержит как частные случаи различные решения Лагранжа, Пуассона, Гамильтона и Якоби, относящиеся к интегрированию уравнений динамики. Труды М. В. Остроградского намного опередили развитие ряда научных вопросов за границей. Например лишь в 1840 г. Парижская Академия наук объявила премию за решение проблемы, уже решенной М. В. Остроградским в его мемуаре о вычислении вариаций кратных интегралов, напечатанном в издании Российской Академии Наук в 1834 г. — *Ред.*

[2] Впервые сходимость рядов, при помощи которых Хилл проинтегрировал дифференциальные уравнения движения луны, доказал в 1894 г. выдающийся математик и механик академик Александр Михайлович Ляпунов (1857—1918) в работе „О рядах, предложенных Hill'ом для представления движения луны". В трудах А. М. Ляпунова созданы фундаментальные методы исследования устойчивости равновесия и движения механических систем. В частности, в этом цикле работ А. М. Ляпунов впервые дал весьма общий метод построения периодических решений систем нелинейных дифференциальных уравнений. А. М. Ляпунов был ближайшим учеником академика П. Л. Чебышева и являлся ярким представителем знаменитой Петербургской математической школы, столь много сделавшей в области приложений математического анализа к механике. — *Ред.*

теории колебательного движения тела (маятника) в сопротивляющейся среде. Конечно, корабельному инженеру столь же мало дела до движения Луны и ее перигея, как было Хиллю до качаний корабля и разного рода технических вопросов, между тем метода, Хиллем созданная, дает в руки техника и инженера могучее средство для решения чисто инженерных вопросов.

В четырнадцати громадных томах in 4° сочинений Лагранжа около 3000 страниц посвящено астрономии, а слово „корабль" даже не встречается в его сочинениях, между тем *методы*, созданные Лагранжем, проникают, можно сказать, *всю* технику.

Если у Лапласа брать только те уравнения, которые он интегрирует, и забыть, что они относятся к движению светил небесных, то мы получим ряд превосходнейших примеров интегрирования уравнений, встречающихся во многих вопросах техники и теории корабля — интегрирования, доведенного до *конца*, т. е. до численных результатов.

Вот этой-то идеей единства науки и математики как инструмента или орудия количественного исследования чисто технических вопросов и должен проникнуться инженер и должен знать, где ему надо нужный инструмент искать и как этим инструментом пользоваться.

§ 4. Первое слово в учении о сопротивлении воды движущемуся в ней телу принадлежит Ньютону, давшему закон механического подобия, через 180 лет послуживший В. Фруду к установлению его способа испытания моделей и изучения по ним ходкости корабля.

Здесь, кроме чисто теоретических исследований, выступают исследования экспериментальные, начиная от опытов самого Ньютона и его исследования качаний маятника в воде и воздухе. Прямые опыты французских академиков над телами разной формы и, наконец, грандиозные опыты полковника Марк-Грегора Бофуа, можно сказать, не привели к ожидаемым от них результатам, но мне кажется, что в курс теории корабля надо вводить критический анализ этих опытов, ибо ошибки и неудачи, может быть, еще более поучительны, нежели удачи.

Здесь возникает вопрос, надо ли в самой теории корабля излагать по Гауссу методу обработки любых экспериментальных исследований и наблюдений, т. е. так называемый *способ наименьших квадратов.* В каком объеме и какой методы изложения придерживаться? Если мы от теории корабля перейдем к исследованию его вибрации, то опять мы столкнемся с трудами Эйлера, Лагранжа, Фурье и Пуассона о вибрации стержней, струн и распространении тепла, ибо здесь придется иметь дело с представлением функций в виде рядов тригонометрических или более общих, т. е. расположенных по фундаментальным функциям, к данной задаче относящимся.

Полагаю, что приведенных примеров более чем достаточно, чтобы показать связь между теорией корабля и математикой.

§ 5. Возникает вопрос, в какой же мере в самый курс теории корабля надо вводить отделы математики, которые только как бы растворяются в курсе теории корабля, где и когда этот раствор становится *насыщенным*, а затем *пересыщенным*, и растворяемое начинает из растворителя осаждаться, и крепость раствора достигает своего предела. Вот в установлении этой-то меры и состоит одна из главных задач нашей конференции.

Не вдаваясь в детали, я постараюсь высказать по этому поводу несколько общих положений. Прежде всего здесь надо вспомнить научный спор, возникший в 1869 г. между величайшим физиком XIX столетия Вильямом Томсоном и не менее знаменитым в своей области геологом Хексли.

Я не раз упоминал об этом споре, но упомяну о нем еще раз, ибо слова Хексли должны быть, по выражению Платона Яковлевича Гамалеи, столь много сделавшего в начале 1800-х годов для морского образования, „постоянно в уме присущи“ у всякого техника и инженера, которому приходится для решения *конкретных* практических вопросов обращаться к математике.

Между Томсоном и Хексли возникла полемика по поводу возраста земли со времени ее отвердения. Томсон на основании некоторых физических предпосылок определял этот возраст примерно в 50 миллионов лет. Хексли на основании геологических данных считал — около 500 миллионов лет.

Возражая своему противнику, Хексли писал:

„Я желаю отметить, что здесь, как мне кажется, имеет место один из многих случаев, когда общепризнанная точность математических процессов применяется, чтобы придать совершенно недопустимый облик истинности результатам, при помощи этих процессов полученным.

„Математику можно уподобить мельнице удивительного совершенства, которая размалывает засыпку до любой степени тонкости; тем не менее, то, что *получается*, всецело зависит от того, что под жернов засыпается, и как наилучшая в мире мельница не доставит пшеничной муки из лебеды, так и страницы формул не доставят заслуживающего доверия результата по сомнительным данным“.

В полемику, которая шла в самом корректном и вежливом тоне, вмешался архиепископ йоркский, по фамилии, насколько помню, Вильберфорс, и обратил внимание, что оба ученые впали в ересь, ибо 1869 год, считая от сотворения мира по библейскому учению, есть 7377, и предостерег их от еретических заблуждений. Когда на его слова внимания обращено не было, и ученые продолжали спорить о миллионах лет, разгневанный архиепископ издал архипастырское послание, в котором посоветовал своим духовным чадам прочесть и поразмыслить над ст. 11 гл. XXVI книги „Премудрости Соломоновой“. Стих этот гласит: „Яко пес возвращается на блевотину свою, так и глупый повторяет глупость свою“.

Общая пресса это подхватила, и началась полемика между реакционными духовными газетами и либеральными светскими, и вскоре обе стороны прибегли к столь выразительному языку, которому могли бы позавидовать

грузчики лондонского порта, не уступающие в этом отношении нашим ломовым извозчикам.

Чтобы перевести конкретный практический вопрос на математический язык, необходимо всегда сделать ряд допущений или гипотез, которые и являются засыпкой на мельницу Хексли; здесь примесь лебеды к пшенице неизбежна, но надо стараться, чтобы как можно меньше лебеды было подмешано к пшенице, а не наоборот.

Вот эти-то допущения и гипотезы должны быть ясно и определенно высказаны и, если потребуется, подвергнуты критическому анализу. Здесь часто грешат — сделают грубое предположение, а затем ведут вычисление, пользуясь или вычислительной машиной, и выписывают все 12 знаков, которые она дает, или же вычисляют по 7-значным логарифмам.

§ **6.** Ясно, что результат вычисления не может быть *точнее* тех данных, которые послужили для вычисления.

Данные для кораблестроительных вычислений доставляются чертежами корабля и редко непосредственными измерениями. Эти данные вообще не точнее, как до 4 значащих цифр, но стоит открыть любой справочник, в особенности иностранный, и мы увидим, что он пестрит 7-, 9- и даже 12-значными числами, у которых лишь первые 3 верны, а все остальные ложны.

Предел нелепости в этом отношении представлял один из сортаментов французских заводов Шамона, где моменты инерции фигурной стали показаны с 17 значащими цифрами, и тут же сказано, что в весе не допускается „недокат", а допускается лишь отклонение в минусовую сторону до 2%. Дальше этого некуда итти!

Вообще, в большей части справочников приведены схемы и образцы вычислений, которые могли бы служить образцами того, как эти вычисления делать *не надо*, а не того, как их *делать надо*. Это также есть изрядная засыпка лебеды под жернова математической мельницы Хексли.

Из-за несоблюдения основных правил производства численных вычислений учащемуся часто представляется, что вычисление остойчивости при больших наклонениях корабля есть своего рода „жупел", для предохранения от которого измышлены всякого рода способы, как то: Барнса, Дарньи, Даймара, Гюйу, Дуаера, Матросова и пр., которые и вводятся в курсы и загромождают их, и без вреда для дела, а скорее с пользою для него, из программ и курсов могут быть опущены.

Но вдаваться в такие подробности будет более уместно при обсуждении целевых установок предмета, программ, объяснительных к ним записок, а не во вступительном слове, но один вопрос я позволю себе поставить — это согласование курсов математики, механики и теории корабля как по их последовательности прохождения, так и содержания.

Мне остается лишь выразить пожелание, чтобы работы нашей конференции послужили к пользе учащихся и облегчили им усвоение весьма важного для избранной ими специальности предмета.

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ[1]

Введение

Теория корабля составляет особую часть прикладной механики; предметом ее исследования является изучение мореходных качеств корабля. Уже Сенека требует от хорошего корабля: „Navis bona dicitur... stabilis et firma, gubernaculo parens, velox et consentiens vento“, и до сих пор еще под мореходными качествами подразумеваются главным образом следующие: плавучесть, остойчивость, плавность и малость розмахов боковой и килевой качки, ходкость и хорошая поворотливость. Общая задача теории корабля заключается в том, чтобы установить определенную меру для каждого из этих качеств и определить их зависимость от элементов корабля, его формы и нагрузки.

К сожалению, до сих пор задача эта удовлетворительно решается только частично. Можно сказать, пожалуй, что всюду, где можно обойтись *гидростатикой*, вышеназванная задача решается удовлетворительно, и, наоборот, сделаны только первые шаги там, где дело идет об использовании *гидродинамики*.

В соответствии с этим положением вещей целью настоящей статьи не является одинаково исчерпывающее изложение всех вопросов. Здесь будут больше затронуты лишь те вопросы, которые уже при обосновании гидростатических положений подверглись большой математической обработке, проверенной наблюдениями и опытами.

Введение, помещенное в п. 1, имеет целью охарактеризовать основные, изложенные в пп. 2—6 проблемы теории корабля; при этом форма исторического обзора избрана здесь для того, чтобы иметь возможность в самой статье дать изложение основных результатов, которое предпочтительно потому, что в задачу статьи не входит историко-критическая оценка всей обширной, имеющейся по этому вопросу литературы.

---

[1] Перевод статьи, напечатанной в „Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften“ (Band IV, Nr. 22), 1907.

1. Основные проблемы теории корабля в их историческом развитии

Гидростатический закон Архимеда есть основной закон, который охватывает все вопросы, касающиеся плавучести и остойчивости корабля, и сводит их к геометрической задаче. Однако закон этот впервые был применен в практике кораблестроения только в XVI в., когда стали вычислять водоизмещение кораблей. Но в течение последующих двух столетий кораблестроение представляло собой все еще полное тайн искусство, так что едва ли можно было говорить об общем научном представлении его основных принципов.

В 1730 г. Л. Эйлер предполагал поступить на службу в русский морской флот. Приблизительно в это же время (1735) астроном П. Бугер был послан в Перу для измерения длины дуги меридиана. Возможно, что эти обстоятельства и побудили Эйлера и Бугера заняться более обстоятельно теорией корабля. В 1746 г. появляется работа Бугера „Traité du navire", а в 1749 г. эйлерова „Scientia navalis". Это были две первые основательные работы по теории корабля. Они показали в частности, что теория корабля представляет собою обширное поле для применения математики и ее новейших методов, так что после этого Парижская Академия с 1753 до 70-х годов в качестве тем на премию выбирала в первую очередь такие, которые касались теории корабля и которые должны были побуждать к дальнейшим научным исследованиям. В этих конкурсах принимали участие Л. и И. А. Эйлеры, Д. Бернулли, Ж. П. Бугер, Ш. Боссю и др. В качестве главных результатов этих конкурсов были получены: способы вычисления водоизмещения и положения метацентра, способ определения положения центра тяжести, общее учение о боковой качке корабля, основанное, к сожалению, на ложной гипотезе о структуре волн, и теоретическое исследование о напряжении частей корабля.

Вопросы статики, поскольку они требовали только применения закона Архимеда, получили совершенно удовлетворительное решение. Иначе обстояло дело там, где шла речь о вопросах динамики и, в частности, о гидродинамике и сопротивлении воды.

Уже в „Principia" Ньютона содержатся общеизвестные основные положения о сопротивлении жидкостей и первые попытки их обоснования.[1] Наиважнейшим из этих положений является закон о механическом подобии. Но только спустя 200 лет этот закон послужил основанием для опытов В. Фруда, которые в дальнейшем привели к постройке имеющихся в настоящее время во всех странах бассейнов для опытов над моделями судов по определению сопротивления воды движению корабля.

---

[1] Is. Newton. Principia, II книга, VII отдел. Перевод „Начал" Ньютона со многими оригинальными примечаниями А. Н. Крылова — см. Собрание трудов, т. VII 1936.

То, что одна теория не может ответить на вопрос о сопротивлении воды и что необходимо поэтому обратиться к помощи опыта, стало понятным уже в XVIII в. В 70-х годах XVIII в. во Франции было решено построить целую сеть внутренних водных сообщений. В одном из проектов вместо шлюзованного канала был предложен судоходный туннель. В связи с этим перед Парижской Академией была поставлена задача — установить зависимость сопротивления воды от отношений площади поперечных сечений корабля и канала. Комиссия, состоящая из Даламбера, Кондорсе и Ш. Боссю, предприняла первые систематические опыты по определению сопротивления воды плавающим в ней телам; но после того, как в узких каналах было обнаружено весьма большое сопротивление, опыты эти были прекращены и проект отклонен. Следующие опыты были проведены М. Г. Бофуа в 1795—1798 гг. в Англии. Эти многократно проведенные опыты (они обошлись свыше 50 тыс. фунтов стерлингов) обнаружили, между прочим, наличие в воде так называемого *трения*.

В 1834 г.[1] опыты эти со всеми непосредственно наблюденными результатами были прекрасно изданы Г. Бофуа.

Начавшееся в 30-х годах XIX в. постепенное развитие паросилового флота придало вопросам сопротивления воды еще бо́льшую важность.

Движение корабля стало независимым от ветра, и появилась возможность заранее устанавливать определенную, желаемую скорость хода корабля; для этого нужно было только определить мощность паровой машины. Эта новая задача в теории корабля была решена сравнительно просто — измерением мощности и достигнутой при этом скорости хода на уже построенных кораблях. Систематизация и обобщение полученных таким образом данных привели к целому ряду эмпирических формул, которые служили для определения индикаторной мощности машины в том случае, когда были даны элементы корабля и назначена скорость хода.

Используя ньютонов закон механического подобия, В. Фруд[2] предложил в 1869 г. свой новый метод исследования сопротивления воды на моделях кораблей. Метод состоит в том, что модель корабля буксируется при скорости, которая относится к скорости корабля, как корень квадратный из соответствующих линейных измерений. Затем определяется сопротивление модели, и после этого вычисляется сопротивление корабля. Английское адмиралтейство приняло предложение Фруда и построило бассейн, где и поставило систематические опыты по определению сопротивления воды движению корабля. Прежде всего Фруд исследовал сопротивление

---

[1] M. G. Beaufoy. Nautical and hydraulic experiments. London, 1834.

[2] W. Froude, Report of the Brit. Assoc., 1872.

трения, буксируя различной длины тонкие доски. В качестве результата этих опытов он дает эмпирическую формулу

$$R_f = ksv^{1.825} \qquad (1)$$

где R_f означает сопротивление трения, s — смоченную поверхность, v — скорость и k — коэффициент, который является функцией длины доски или корабля. Так как эта формула показывает, что сопротивление трения не следует закону механического подобия Ньютона, то Фруд разлагает наблюденное общее сопротивление R модели на две части: R_f — сопротивление трения и $R_W = R - R_f$ — остаточное сопротивление, причем R_f вычисляется по вышеприведенной формуле. Для того же, чтобы установить остаточное сопротивление корабля при соответствующей скорости, достаточно (по закону подобия) умножить R_W на отношение массы корабля к массе модели. Полное сопротивление получится, если к найденному таким образом результату прибавить вычисленное по формуле (1) сопротивление трения корабля.

Хотя этот способ до известной степени может быть обоснован теоретически, его действительное подтверждение могло быть получено только при помощи непосредственных опытов. Эти опыты были произведены в 1874 г. с корветом „Greyhound“ водоизмещением 1200 т и состояли в том, что корвет „Greyhound“ буксировался корветом „Active“ с различными скоростями, и при этом определялась соответствующая тяговая сила буксирного каната. В своем отчете Фруд[1] указал, что предложенный им способ определения сопротивления корабля по сопротивлению его модели был подтвержден опытами на „Greyhound“.

К сожалению, все опыты Фруда были опубликованы в совершенно иной форме, нежели опыты Бофуа: Фруд не дает ни одной цифры непосредственных наблюдений, а лишь диаграммы в уменьшенных масштабах. Подобные диаграммы вполне достаточны для общего обзора, но не для точных расчетов и проверки способа.

Дальнейшая разработка теории корабля тесно связывается с тем быстрым развитием, которое получила, особенно со второй половины XIX в., практика кораблестроения.

Постройка броненосцев привела, прежде всего, к новому, подробному исследованию боковой и килевой качки корабля. Распределение веса на броненосце было совершенно иным, нежели на парусных судах. Сила пара дала возможность назначать любой курс относительно волн, количество мачт и парусов было уменьшено или они были совершенно упразднены. Все это привело к иному поведению броненосцев на море, отличному от поведения парусных судов; не могло быть больше речи о смягчающем действии парусов на боковую качку. Систематические опыты показали,

---

[1] W. Froude, Trans. Inst. Nav. Archit., 15 (1874), p. 36.

что корабли с наибольшей остойчивостью были самыми беспокойными на волнах, что совершенно противоречило прежней теории. И здесь снова мы обязаны Фруду теми основными принципами, которые привели к освоению этих совершенно новых качеств.

В 1861 г. он изложил в Обществе корабельных инженеров свою теорию боковой качки корабля, основанную на свойствах трохоидальных волн.[1] Позднее эта теория была подтверждена многочисленными опытами самого В. Фруда[2] и Е. Бертэна.[3]

Бронирование кораблей повело далее к постройке низкобортных кораблей, которые обладали совершенно особой остойчивостью. Это не учли сначала, вследствие чего произошла катастрофа с „Captain".

В 1867 г. капитану Кользу пришла мысль объединить на одном и том же корабле толстую бортовую броню, тяжелую башенную артиллерию, низкий надводный борт и полный корабельный рангоут. Таким образом возник „Captain". В одном из докладов Э. Рид[4] указал на опасность, которой может подвергнуться низкобортный корабль с полным корабельным рангоутом при известных условиях в штормовую погоду. Он отчетливо установил разницу между статической и динамической остойчивостью, объяснил действие шквала на корабль и опасность, которая при этом возникает для низкобортных кораблей. Но на эти предостережения не обратили никакого внимания, и при первом своем опытном плавании под парусами в эскадре вице-адмирала Мильна „Captain" был опрокинут незначительным шквалом, который не причинил никакого вреда остальным десяти кораблям эскадры, причем из 550 человек экипажа спаслись на полубаркасе, благодаря счастливой случайности, только 17 человек. Эта катастрофа с „Captain" впервые дала повод к тому, чтобы самым обстоятельным образом исследовать остойчивость при больших наклонениях и выработать новые методы расчета.

Другие кораблекрушения с большими человеческими жертвами, в особенности катастрофа „Victoria" и парохода „Elbe", привели к исследованию вопросов распределения переборок на кораблях и влияния повреждений отсеков корабля на его остойчивость.

Железное и стальное кораблестроение показало особое значение напряжений, которым подвергаются отдельные части конструкции корабля при боковой и килевой качке. Основания для общего исследования величины срезывающих сил и изгибающих моментов, которые действуют в каждом

---

[1] W. Froude. On the rolling of ships. Trans. Inst. Nav. Archit., 2 (1861), p. 180.

[2] W. Froude. Description of an instrument for automatically recording the Rolling of ships. Trans. Inst. Nav. Archit., 14 (1874), p. 168.

[3] E. Bertin. Observation du roulis et du tangage. Mém. prés. par div. sav., 26, (1878), Paris.

[4] E. Reed. Stability of monitors under canvas. Trans. Inst. Nav. Archit., 9 (1869), p. 198.

поперечном сечении корабля, были даны уже в 1759 г. Л. Эйлером.[1] Но только в 1871 г. Э. Рид[2] развил дальше мысли Эйлера и применил к современным кораблям. Должно, однако, сказать, что даже в том случае, когда известны действующие силы, еще далеко до полного знания распределения напряжений, вызванных в отдельных частях корабля. Здесь следовало бы вернуться опять к опытам. Катастрофа с „Cobra“ (английский миноносец „Cobra“ во время шторма переломился пополам и погиб) и необходимость увеличить длину корабля для того, чтобы сэкономить при этом „мертвый вес“, побудит, конечно, к таким опытам.

В последнее десятилетие в теории корабля возник еще новый вопрос об упругих колебаниях, или вибрациях корабля. На некоторых судах при известном числе оборотов машины была замечена весьма сильная вибрация, которая при другом числе оборотов машины прекращалась. Вскоре теоретические и экспериментальные исследования показали, что мы имеем здесь дело с явлениями резонанса. Уравновешивание машины и укрепление корпуса корабля — средства, которые применяются против вибрации. Полезно, однако, предварительно установить частоту колебаний корабля, который можно рассматривать как упругий стержень; можно наперед избежать неблагоприятных явлений резонанса, если при проектировании машины и винта выбрать такое число оборотов, которое или совершенно не совпадает или совпадает только в случае малоупотребительных скоростей с частотой колебаний корабля.

2. Плавучесть корабля

Плавучесть есть свойство корабля плавать при данной нагрузке и при этом сохранять заранее установленную ватерлинию. Для этого, согласно закону Архимеда, необходимо, чтобы вес вытесненной кораблем воды был бы равен весу самого корабля; последний есть сумма ряда отдельных весов, которые могут быть расположены в следующем порядке: 1) корпус корабля, 2) оборудование и снабжение, 3) машины, 4) запас угля, 5) (на военных кораблях) броня и вооружение.

У торговых кораблей вместо последних весов имеет место вес груза, т. е. вес товаров, пассажиров, багажа и т. д.

Осуществленные ныне типы кораблей, классифицированные по величине и назначению, дают общее представление о процентном распределении этого веса, о чем более подробно можно найти в справочниках.

---

[1] L. Euler. L'éxamen des efforts qu'ont à soutenir toutes les parties du navire dans le roulis et dans le tangage ... Recueil des pièces ..., 8 (1771), Paris.

[2] E. Reed. On the unequal distribution of weight and support and its effects in still water and in exceptional positions on shore. Phil. Trans., 161 (1871), London, p. 413 ff.

Под запасом плавучести понимают ту нагрузку или вес того объема воды, который при пробоине может проникнуть в корабль, прежде чем он пойдет ко дну. Этот объем воды равен объему надводной части корабля до его верхней палубы и зависит, следовательно, от высоты надводного борта. Высота эта для торговых судов устанавливается законоположениями, извлеченными из практики и гарантирующими корабль от случайной перегрузки.

Таким образом, все, что касается плавучести, сводится к вычислению объемов. Эти вычисления выполняются по так называемому *теоретическому чертежу* корабля. Теоретический чертеж представляет собой в прямоугольных проекциях линии сечения наружной поверхности плоскостями, параллельными плоскостям проекций. Для стальных кораблей теоретический чертеж вычерчивается без тонкой наружной обшивки. В качестве плоскостей проекций служат: 1) плоскость симметрии или диаметральная плоскость корабля, 2) плоскость ватерлинии и 3) поперечное сечение, или плоскость шпангоута, перпендикулярная к двум другим плоскостям.

Если продольную плоскость корабля принять за плоскость zx и обозначить через y ординату наружной поверхности корабля, соответствующую координатам x, z, то погруженный объем корабля, называемый *водоизмещением*, может быть выражен посредством следующего двойного интеграла

$$V = 2 \int \int y \, dx \, dz$$

причем интегрирование распространяется на всю подводную часть диаметральной плоскости. Так как ордината y не задается аналитически в виде функции от x и z, а только графически — посредством теоретического чертежа, то этот интеграл может быть вычислен лишь приближенно, с помощью формул квадратур. Для возможно простого выполнения этих и аналогичных им вычислений необходимо соблюдать следующие общие правила:[1] 1) точность расчета должна соответствовать точности чисел, а числа должны соответствовать практически требуемой точности конечного результата; 2) число ординат, вводимых в формулы квадратур, и сами эти формулы должны соответствовать требуемой в конечном результате точности; 3) вычисление должно производиться по заранее заготовленной схеме, причем в каждом числовом значении повсюду следует сохранять только необходимое число цифр. Требуемая на практике точность при этом никогда не превосходит $\frac{1}{2}\,\%$, т. е. $\frac{1}{200}$ конечного результата. Для выполнения квадратур обычно применяется правило трапеций и первое правило

[1] A. Kriloff. Nouvelle méthode du calcul des éléments d'une carène. Bull. de l'Assoc. techn. maritime (1893), p. 97. Перевод статьи помещен на стр. 55—102 этого тома.

Симпсона;[1] применение чебышевской формулы квадратур вносит большое упрощение и симметрию в расчеты.[2] Хорошую услугу при этом оказывают механические приборы, в особенности, планиметр и интегратор.

Для того чтобы охарактеризовать форму корабля, вычисляются обычно еще следующие соотношения:

1) Коэффициент общей полноты корабля, т. е. отношение δ водоизмещения V к объему прямоугольного параллелепипеда, построенного на его длине L, ширине B и средней осадке H

$$\delta = \frac{V}{LBH}$$

2) Отношение α погруженной площади S мидель-шпангоута к площади BH описанного около него прямоугольника

$$\alpha = \frac{S}{BH}$$

3) Отношение β площади W ватерлинии к площади BL описанного около нее прямоугольника

$$\beta = \frac{W}{BL}$$

4) Отношение γ и λ водоизмещения к объему цилиндров, построенных на ватерлинии и на мидель-шпангоуте

$$\gamma = \frac{\delta}{\alpha}; \quad \lambda = \frac{\delta}{\beta}$$

Для указанных соотношений, в соответствии с величиной, назначением и скоростью корабля, практика установила известные пределы, которыми надлежит пользоваться при разработке проектов судов, руководствуясь при этом уже достигнутым опытом.

Для того чтобы облегчить суждение о соответствующем каждой средней осадке водоизмещении плавающих кораблей, следует представить взаимозависимость обеих величин графически: либо посредством кривой в прямоугольных координатах, либо посредством шкалы, которая называется *шкалой водоизмещения*. Небольшие изменения e средней осадки, которые вызываются относительно малыми нагрузками p, вычисляются

---

[1] Более подробные указания об употреблении этих формул можно найти в справочниках.

[2] См. сноску на предыдущей странице.

по линейной формуле $e = \frac{p}{q}$, где q означает число тонн на сантиметр осадки и рассчитывается по площади ватерлинии. При переходе корабля из соленой морской воды в пресную речную воду, и наоборот, его средняя осадка также изменяется. Это изменение составляет 2% осадки при переходе из океанской воды, с удельным весом 1.026, в пресную.

3. Остойчивость корабля

Остойчивость есть способность корабля плавать в прямом положении и, в случае, если это положение будет нарушено действием внешних сил, вновь возвращаться к нему после прекращения указанного действия. При исследовании остойчивости корабль рассматривается в условиях спокойной воды, и при этом движение корабля принимается настолько медленным, что можно не обращать внимания на гидродинамические силы, проистекающие от движения жидкости. Корабль подвергается тогда действию: 1) своего веса; 2) суммарного давления воды, которое называется *плавучестью*, или *силой поддержания*; 3) подъемной силы воздуха. Этой последней силой, однако, всегда пренебрегают, как вследствие ее незначительности по сравнению с двумя другими действующими силами, так и вследствие того, что принятые в практике судостроения веса относятся к взвешиванию в воздухе. Вес и сила поддержания действуют вертикально; точка приложения G первой силы есть центр тяжести корабля, точка приложения C_0 силы поддержания есть центр тяжести вытесненного кораблем объема воды. Эта точка называется *центром величины* (центром тяжести водоизмещения или центром силы поддержания).

При равновесии корабля вес и сила поддержания равны друг другу. Их точки приложения, G и C_0, лежат на одной и той же вертикали. В теории корабля принимают следующие допущения: 1) продольная плоскость корабля есть плоскость симметрии формы и распределения массы; 2) длина L корабля значительно больше его ширины B. Отсюда следует, что одна из главных осей инерции площади ватерлинии практически параллельна продольной плоскости корабля, и соответствующий ей момент инерции I_1 площади ватерлинии значительно меньше другого момента инерции I_2 относительно перпендикулярной к ней оси. Эти моменты относятся друг к другу приблизительно так, как $L^2 : B^2$ (отношение $L : B$ для обычных морских кораблей лежит между 4 и 10). Метацентр при наклонениях около продольной оси лежит ниже метацентра для наклонений около поперечной оси. Поэтому достаточно исследовать только остойчивость при наклонениях около продольной оси.

Рассмотрим прежде всего *остойчивость для малых наклонений*, или так называемую *начальную остойчивость*.

Прямым положением корабля называют такое, при котором его диаметральная плоскость вертикальна и заранее установленная грузовая ватерлиния совпадает с уровнем воды. Условие остойчивости тогда состоит в том, чтобы *центр тяжести лежал ниже поперечного метацентра* M_1. Точка M_1 находится в продольной плоскости корабля над точкой C_0 на расстоянии

$$\rho_1 = C_0 M_1 = \frac{I_1}{V_0}$$

Положение точки C_0 вычисляется на базе теоретического чертежа корабля путем применения приближенных формул квадратур для вычисления интегралов, определяющих ее координаты ξ_0, η_0, ζ_0

$$\left.\begin{aligned} \xi_0 &= 2\frac{\int\int xy\,dx\,dz}{V_0} \\ \eta_0 &= 0 \\ \zeta_0 &= 2\frac{\int\int zy\,dx\,dz}{V_0} \end{aligned}\right\}$$

M_1 находится из соотношения

$$\rho_1 = C_0 M_1 = \frac{2}{3}\frac{\int y_0^3\,dx}{V_0}$$

Здесь приняты те же обозначения, что в п. 2, равно как сохранена та же область интегрирования.

В последней формуле y_0 означает ординату ватерлинии, соответствующую абсциссе x, и интегрирование должно быть распространено по всей длине ватерлинии.[1]

При составлении проекта корабля положение центра тяжести вычисляется по уравнениям статических моментов, взятых по отношению к избранным координатным плоскостям для отдельных грузов корабля. При этом грузы распределяются так, что G лежит на той же вертикали, что C_0 и M_1 и притом ниже метацентра M_1.

Положение центра тяжести G на уже построенном корабле устанавливается опытным путем с помощью так называемого *кренования*. Этот опыт состоит в том, что перемещают поперек корабля известный груз p

---

[1] Схемы и практические указания к расчетам можно найти в справочниках и учебниках.

на величину l и при этом наблюдают получающийся крен θ.[1] Далее пользуются соотношением

$$GM_1 = \frac{p \cdot l}{P \operatorname{tg} \theta}$$

До тех пор, пока на высокобортных кораблях угол наклонения меньше 15—20°, а на низкобортных кораблях кромка верхней палубы не погружена в воду, крен можно считать „малым". В этом случае точку M_1 практически рассматривают как неизменную, и для вычисления момента остойчивости, соответствующего углу крена θ, именуемого *восстанавливающим моментом* $\mathfrak{M}$, применяется так называемая *метацентрическая* формула

$$\mathfrak{M} = P \cdot \overline{GM_1} \cdot \sin\theta$$

Наклонениям около поперечной оси, вызывающим *изменение дифферента*, соответствует продольный метацентр M_2, расстояние которого от центра величины составляет

$$R = C_0 M_2 = \frac{I_2}{V_0}$$

Для большинства встречающихся на практике изменений дифферента точка M_2 может рассматриваться так же, как неизменная; тогда углу дифферента ψ соответствует *дифферентующий момент*

$$T = P \cdot \overline{GM_2} \cdot \sin\psi$$

а продольному перемещению l груза p — изменение дифферента

$$\delta = \frac{pl}{P} \frac{L}{\overline{GM_2}}$$

Для исследования остойчивости корабля при больших наклонениях около продольной оси представим себе систему плоскостей ватерлиний, перпендикулярных к плоскости шпангоута и отсекающих один и тот же подводный объем V_0 корабля. Поверхность, которая является огибающей по отношению к этой системе плоскостей ватерлиний, представляет собой цилиндрическую поверхность, производящая которой перпендикулярна плоскости шпангоута. Каждая производящая проходит через центр тяжести площади соответствующей ватерлинии.

Совокупность центров величины C' образует кривую линию. Пара сил,

---

[1] Для практического проведения опытов на военных кораблях в каждом флоте устанавливаются законом особые мероприятия, которые, однако, мало друг от друга отличаются.

образованная весом корабля P и равной ему силой поддержания Q, может быть разложена на две другие, из которых одна лежит в продольной, а другая — в поперечной плоскости наклонения корабля. В этом случае исследование остойчивости состоит в определении момента $\mathfrak{M}$ этой последней пары сил и в представлении его в виде функции от угла крена θ. Для этого не нужно даже знать положения точки C', так как достаточно ее проекции C на поперечную плоскость корабля.

Возьмем в качестве плоскости проекции плоскость шпангоута, проходящего через точку C_0, и назовем геометрическое место точек C кривой C, пересечение упомянутой плоскости с цилиндром — кривой плавания или кривой F. Геометрическое место центров кривизны M кривой C будет представлять собой так называемую *метацентрическую эволюту*. Радиус кривизны выражается формулой

$$\rho = \frac{I_1}{V_0}$$

где I_1 означает момент инерции соответствующей площади ватерлинии, наклоненной на угол θ, относительно оси, проходящей через центр тяжести указанной площади и параллельной продольной плоскости корабля. Точка M рассматривается как метацентр, отвечающий ватерлинии, наклоненной на угол θ. Если принять рассматриваемую поперечную плоскость за координатную плоскость zy, неизменно связанную с кораблем, точку C_0 — за начало координат и придать положительное направление оси z вверх — то центр тяжести корабля G будет лежать на оси z, и его координаты будут $(0, 0, a)$. Если рассматривать как положительное то наклонение, при котором положительная ось y погружается в воду, то могут быть предложены следующие формулы: для координат центра величины C

$$x_c = 0; \quad y_c = \int_0^\theta \rho \cos\theta \, d\theta; \quad z_c = \int_0^\theta \rho \sin\theta \, d\theta$$

для координат метацентра M, соответствующего крену θ

$$x_m = 0; \quad y_m = y_c - \rho \sin\theta; \quad z_m = z_c + \rho \cos\theta$$

для восстанавливающего момента $\mathfrak{M}$

$$\mathfrak{M} = P[y_c \cos\theta + z_c \sin\theta] - P \cdot a \sin\theta$$

для работы пары сил $\mathfrak{M}$

$$\int_0^\theta \mathfrak{M} \, d\theta = P[y_c \sin\theta - z_c \cos\theta] - P \cdot a (1 - \cos\theta)$$

где $\rho = \frac{I_1}{V_0}$, а P означает вес корабля. Пара сил $\mathfrak{M}$ стремится спрямить корабль в том случае, если $\mathfrak{M} > 0$. На практике обычно принято называть корабль при этих условиях *остойчивым*, что следует понимать так: будучи накрененным на любой угол θ, при котором $\mathfrak{M} > 0$, по прекращении действия накреняющих сил корабль возвращается в прямое положение.

Для парусных кораблей должно также исследовать *остойчивость в наклоненном положении* под действием пары сил. Пусть $\mu(\theta)$ обозначает момент кренящей пары в функции от θ, тогда положения равновесия определяются из уравнения

$$\mathfrak{M} - \mu(\theta) = 0$$

Это уравнение обычно имеет два корня, которые могут быть обозначены через θ_1 и θ_2 ($\theta_1 < \theta_2$). Критерий остойчивости будет

$$\frac{d\mathfrak{M}}{d\theta} - \frac{d\mu}{d\theta} > 0$$

Обычно только положение $\theta = \theta_1$ остойчивое. Если кренящая пара μ постоянна, то критерий остойчивости сводится к чисто геометрическому выражению

$$\frac{d\mathfrak{M}}{d\theta} > 0, \quad \text{т. е.} \quad \rho + z_c \cos\theta - y_c \sin\theta - a\cos\theta > 0$$

Это выражение означает, что проекция G_1 центра тяжести на линию CM располагается ниже точки M (т. е. ниже метацентра, отвечающего крену θ). Если на корабль, который под действием пары сил μ находится в наклонном положении $\theta = \theta_1$, внезапно начнет действовать в той же плоскости новая пара сил μ_1, то новое положение равновесия определяется из уравнения

$$\mathfrak{M} = \mu + \mu_1$$

Пусть $\theta = \theta_3$ и $\theta = \theta_4$ — соответствующие значения крена θ; из них пусть θ_3 определяет остойчивое положение, θ_4 — неостойчивое положение. Первый размах корабля Θ, вызванный внезапным действием пары сил μ_1, в том случае, когда сопротивлением воды пренебрегают, определяется с помощью уравнения

$$\int_{\theta_1}^{\Theta} [\mathfrak{M} - (\mu + \mu_1)]\, d\theta = 0$$

В случае, если $\Theta < \theta_4$, корабль возвратится обратно и примет положение $\theta = \theta_3$, после того, когда из-за действия сопротивления воды колебания прекратятся. Но если $\Theta > \theta_4$, то корабль опрокидывается, как это в действительности случилось с „Captain". Интеграл

$$A = \int_0^{\theta} \mathfrak{M}\, d\theta$$

представляющий собой работу, которая должна быть затрачена для того, чтобы наклонить корабль на угол крена θ, называется *динамической остойчивостью корабля*. Она представляет собой способность корабля сопротивляться внезапному действию пары сил.

На практике для вычисления значений $\mathfrak{M}$ и A употребляются различные методы, которые различаются между собой по выбору системы координат, служащих для определения точек C.[1] Система координат связывается с кораблем, либо остается неизменной в пространстве и берется либо прямоугольной, либо полярной и т. п.

Значения $\mathfrak{M}$ и A или отношения $\frac{\mathfrak{M}}{P}$ и $\frac{A}{P}$, называемые *плечами статической* и, соответственно, *динамической остойчивости*, представляются графически как функции от угла θ, значения которого откладываются по оси абсцисс. Получаемые таким образом кривые называются *диаграммами остойчивости*. Они дают наглядное представление об остойчивости корабля, находящегося под действием данной пары сил. Диаграмма статической остойчивости имеет обычно синусоидальную форму, причем для высокобортных кораблей максимум соответствует такому наклонению, при котором кромка верхней палубы погружается в воду. Вычисление остойчивости производится для двух крайних и среднего состояния нагрузки корабля. Если они значительно отличаются друг от друга, то для более удобного интерполирования для одного и того же угла наклона θ, но для ряда различных водоизмещений P вычисляются значения $\frac{\mathfrak{M}}{P}$ или $\mathfrak{M}$. Кривые, представляющие последние величины как функции от P, называются *интерполяционными кривыми остойчивости* или *пантокаренами*.

Если на корабле находится жидкий груз, например нефть или керосин, имеющий свободную поверхность, то происходит уменьшение остойчивости, потому что центр тяжести груза при наклонении перемещается в сторону наклонения. Это изменение может рассматриваться как уменьшение метацентрической высоты на величину

$$\beta = \frac{i}{V_0}\,\frac{\delta}{\delta_0}$$

---

[1] Эти способы приводятся в справочниках и учебниках, равно как и в специальных монографиях.

Здесь i — момент инерции свободной поверхности жидкости относительно прямой, проходящей через ее центр тяжести параллельно оси наклонения, δ — плотность жидкости, δ_0 — плотность воды. Если жидкий груз находится в различных отделениях, то необходимо вычислить β для каждого отделения особо и затем просуммировать результаты. Отсюда видно, что если отделение разделено продольной переборкой пополам, то β будет в четыре раза меньше.

Для современных кораблей исследуется влияние, оказываемое повреждением отделений на остойчивость, крен и дифферент.[1]

В особенности же опасны повреждения надводного борта и междупалубного пространства, равно как и верхней палубы. Они обусловливают большие потери площади ватерлинии, с чем связано уменьшение метацентрической высоты. Корабль, прежде чем пойти ко дну, теряет свою остойчивость и опрокидывается. Это имело место, например, при гибели „Victoria". Опасность эта может быть устранена с помощью надлежащего распределения водонепроницаемых переборок.[2]

В тесной связи с вопросом остойчивости стоит также вопрос исследования спуска судов на воду, о чем более подробно можно прочитать в книге Поллар и Дюдебу,[3] и в статье И. Г. Бубнова.[4]

4. Качка корабля

a. Введение. Качка различается по направлению оси, около которой она совершается. Сообразно с этим она называется: a) *боковой*, когда корабль качается около своей продольной оси; b) *килевой*, когда он качается

---

[1] Изучение плавучести и остойчивости корабля при получении им подводных пробоин развилось в особый раздел теории корабля — непотопляемость. Учение о непотопляемости корабля создано трудами выдающегося ученого и флотоводца Степана Осиповича Макарова (1849—1904), который начиная с 1870 г. в ряде статей и книг разработал важнейшие принципы обеспечения этого основного качества корабля. В частности, им впервые предложено спрямление поврежденного корабля намеренным затоплением неповрежденных отделений. Дальнейшее развитие теория непотопляемости получила в работах профессоров Морской академии И. Г. Бубнова и А. Н. Крылова. Последним в 1903 г. были предложены таблицы непотопляемости, которые служат основой для решения аварийных задач и весьма значительно сокращают время, необходимое для расчетов по спрямлению корабля. Таблицы непотопляемости были введены во всех флотах мира значительно позже, чем таблицы А. Н. Крылова в нашем флоте. — *Ред.*

[2] Вопросы надлежащего распределения поперечных водонепроницаемых переборок, влияния длины затопленного отсека на изменение начальной остойчивости поврежденного корабля и зависимость размеров водонепроницаемых отсеков от радиуса разрушительного действия мины (торпеды) впервые подробно исследованы выдающимся ученым — кораблестроителем Иваном Григорьевичем Бубновым (1872—1919) в статье „О непотопляемости судов" (Морской сборник, 1901, №№ 4 и 5). — *Ред.*

[3] J. Pollard et A. Dudebout. Théorie du navire, vol. 2.

[4] И. Г. Бубнов, Морской сборник, 1900 № 2, 3, 5 и 6.

около своей поперечной оси; с) *рысканьем*, когда корабль колеблется около своей вертикальной оси, что, например, происходит вследствие плохого управления. Эти качания обычно сопровождаются вертикальными колебаниями центра тяжести, носящими название *всплывания*. Колебания называются *свободными*, если они, возникнув вследствие первоначального нарушения равновесия, совершаются на *тихой воде*, без какого-либо влияния других внешних сил, кроме веса и силы поддержания. Они называются *вынужденными*, если сохраняются благодаря продолжительному действию возмущающих сил, как, например, влияние *волн*, ветра, перемещения грузов, толчков и т. п.

Свободные колебания корабля рассматривались уже Эйлером,[1] который объяснил маятниковый характер этого движения и определил длину простого маятника с периодом качания, равным периоду качания корабля при боковой или килевой качке. Эйлер исследовал также всплывание. Так как свободные колебания, при условии действия на корабль только силы поддержания и веса, являются хорошим примером для применения способа малых колебаний Лангранжа, то изложение их можно найти в большей части учебников теоретической механики, как, например, у Пуассона.[2]

Изучение *вынужденных колебаний*, или поведения корабля на волнении, исходит от Д. Бернулли.[3] Его результаты в течение почти столетия оставались классическими, хотя они и не совпадают с современными воззрениями и опытом, в особенности потому, что колебательные движения воды и принятое вертикальное направление поддерживающей силы не совсем соответствуют действительности. Однако уже Бернулли пролил яркий свет на случай сильной боковой качки при наступлении равенства периода качаний корабля и периода волн.

В 1861 г. В. Фруд дал свою теорию *боковой качки*.[4] Силе поддержания в соответствующих точках он придает не вертикальное направление, а нормальное к волновой поверхности; причем с помощью общих рассуждений о поверхностях уровня и на основании опытных данных он считает это допущение соответствующим действительности. Фруд рассматривает корабль идущим лагом к волнам и принимает его поперечные размеры бесконечно-малыми в сравнении с размерами волны; при этом профиль волны он полагает синусоидальным и считает наклонение корабля, как и склоны волн, „малыми".

Полученная при этих условиях боковая качка состоит из совокупности свободных и вынужденных колебаний, чем Фруд и объясняет неравно-

---

[1] L. Euler. Scientia navalis. St.-Petersburg, 1749.

[2] S. D. Poisson. Traité de mécanique, 2, 2. éd., Paris, 1883.

[3] D. Bernoulli. Sur la manière de diminuer... le roulis et le tangage du navire, Récueil des piè es, 8 (1771).

[4] W. Froude. On the rolling of ships. Trans. Inst. Nav. Archit., 2 (1861), p. 180.

мерный характер качки и влияние соотношения периодов на поведение корабля. В 1863 г. В. Ранкин[1] снова открыл данную в 1804 г. Фр. Герстнером[2] теорию трохоидальных волн. Благодаря этому фрудовские предположения о поддерживающей силе получили новое освещение и строгое теоретическое обоснование. Как следствие этого возобновился интерес к изучению боковой качки корабля; появилась целая серия значительных работ. В особенности следует отметить работы Бертена,[3] в которых он не только отказался от фрудовских ограничений относительно размеров корабля и учел сопротивление воды, но также дал точное описание качки корабля.

Метод Бертена, вполне справедливый для оценки боковой качки, недостаточен для расчета *килевых* качаний, равно как и для рассмотрения случая движения корабля, складывающегося из боковой и килевой качки, рысканья и всплывания имеющего место в том случае, когда корабль идет косым курсом к волне. Эту общую теорию, прежде всего для килевой качки, а затем для общего случая движения дал А. Н. Крылов.[4]

В последующих пп. **4b — f** будет дан обзор современного состояния учения о качке корабля, не включающий ссылок на старые работы. Для возмещения недостающих литературных сведений может служить предыдущий краткий обзор и ссылка на книгу Поллар и Дюдебу, где в первом томе имеется подробный список литературы по 1890 г.

b. Свободные колебания (корабль на тихой воде). Для того чтобы изучить свободные колебания корабля, сделаем следующие предположения: 1) корабль совершает только малые колебания около своего положения равновесия; 2) на корабль действуют сила его собственного веса, сила поддержания и сопротивление воды; 3) вода остается спокойной (давление всюду гидростатическое), и ее поверхность не нарушается кача-

---

[1] W. J. Rankine. On the exact form of waves near the surface of deep water, London. Phil. Trans., (1863), p. 53 = Misc. scientific papers, London, 1881, p. 481.

[2] Fr. Gerstner. Théorie der Wellen. Prag, 1804.

[3] E. Bertin. Notes sur la résistance des carènes au roulis et sur les qualités nautiques. Mém. prés. par div. sav., (2), 22 (1876), Paris; Observations de roulis et de tangage exécutées avec l'oscillographe double à bord de divers bâtiments. Mém. prés. par div. sav. (2), 26 (1878), Paris [prés. 1876]. — Bertins donnés théoretiques expérimentales sur les vagues et le roulis. Эти сочинения, впервые с другими статьями опубликованные в Шербурге (Mém. de la Soc. des Sciences, 1869—1879), появились также отдельным произведением в Париже, в 1880 г.

[4] A. Kriloff. A new theory of the pitching motion of ships on waves. Trans. Inst. Nav. Archit., 37 (1896) = Théorie du tangage sur une mer houleuse. Bull. de l'Assoc. techn. maritime, 1896, N° 4; A general theory of the oscillations of ship on waves. Trans. Inst. Nav. Archit., 40 (1898) = Théorie générale des oscillations du navire sur une mer houleuse. Bull. de l'Assoc. techn. maritime, 1897, No. 8; 1901, No. 12. (см. т. XI Собрания трудов).

нием корабля. Это последнее допущение существенно упрощает изучение качки корабля. Произвольность этого допущения практически компенсируется тем, что сопротивление воды качаниям корабля оценивается опытным путем и экспериментальные данные затем вводятся в расчет. Так как моменты инерции кораблей или зависящие от них периоды боковой качки определяются непосредственно опытом, то влияние колеблющейся совместно с кораблем массы воды также учитывается экспериментальными данными.

Так как плавающий корабль рассматривается как свободное тело, то его положение в пространстве определяется с помощью трех координат его центра тяжести и трех эйлеровых углов, через систему координат, неизменно связанную с кораблем, и систему координат, неподвижных в пространстве. Примем центр тяжести корабля G за начало неизменно связанных с кораблем координат Gx, Gy, Gz и плоскость симметрии корабля примем за плоскость zx; положительное направление оси z примем вниз; ось y направим на правый борт перпендикулярно к диаметральной плоскости и ось x — параллельно ватерлинии корабля в корму. За неподвижные в пространстве оси координат $O\xi$, $O\eta$, $O\zeta$ изберем такие, которые при положении равновесия корабля совпадают с подвижными осями. Всплывание или вообще поступательные перемещения корабля, т. е. колебания его центра тяжести, определятся тогда значениями, которые примут его (центра тяжести) координаты ξ_0, η_0 ζ_0 в момент времени t. Они удовлетворяют обычному при исследовании малых колебаний условию — исчезать при положении равновесия или оставаться „малыми“, когда корабль приближается к этому положению.

Вращательные движения корабля определяются с помощью эйлеровых углов. Здесь нельзя признать целесообразным принятый в астрономии выбор этих углов, так как они не удовлетворяют условию — при небольших отклонениях корабля от положения равновесия оставаться „малыми“. Поэтому следует выбирать эйлеровы углы таким образом: проведем через точку O — начало неподвижных в пространстве осей — три оси: Ox_1, Oy_1, Oz_1, соответственно параллельные осям Gx, Gy, Gz. Пусть ON будет линией пересечения плоскости $\xi\zeta$ с плоскостью $x_1 y_1$; затем положим угол $\xi ON = \psi$ и примем за положительное направление от $O\xi$ к $O\zeta$; далее пусть угол $NOx = \varphi$, и пусть он будет положительным в направлении от Ox_1 к Oy_1; обозначим, наконец, через $\frac{\pi}{2} + \theta_1$ наклонение плоскости $x_1 y_1$ по отношению к плоскости $\xi\zeta$, причем θ_1 отсчитывается в положительном направлении вращения. Тогда ψ, φ, θ_1 будут тремя эйлеровыми углами, которые точно определяют положение корабля и удовлетворяют условию оставаться „малыми“. При этом ψ будет соответствовать килевой качке, θ_1 — боковой и φ — рысканью.

Для направляющих косинусов обеих систем координат будут иметь место формулы

$$
\begin{aligned}
a &= \cos(x,\xi) = \cos\varphi\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi\sin\theta_1\\
a_1 &= \cos(x,\eta) = \sin\varphi\cos\theta_1\\
a_2 &= \cos(x,\zeta) = -\cos\varphi\sin\psi + \sin\varphi\cos\psi\sin\theta_1\\
b &= \cos(y,\xi) = -\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\psi\sin\theta_1\\
b_1 &= \cos(y,\eta) = \cos\varphi\cos\theta_1\\
b_2 &= \cos(y,\zeta) = \sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi\sin\theta_1\\
c &= \cos(z,\xi) = \sin\psi\cos\theta_1\\
c_1 &= \cos(z,\eta) = -\sin\theta\\
c_2 &= \cos(z,\zeta) = \cos\psi\cos\theta_1
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

а для проекций угловой скорости на оси x, y, z — кинематические уравнения

$$
\left.
\begin{aligned}
p &= \psi'\sin\varphi\cos\theta_1 + \theta_1'\cos\varphi\\
q &= \psi'\cos\varphi\cos\theta_1 - \theta_1'\sin\varphi\\
r &= \varphi' - \psi'\sin\theta_1
\end{aligned}
\right\} \qquad (2)
$$

Если рассматривать углы ψ, φ и θ_1 и их производные ψ', φ', θ_1 как малые величины первого порядка, то можно в предыдущих формулах оставить только первые степени, и тогда получим

$$
\left.
\begin{aligned}
a &= 1, \quad a_1 = \varphi, \quad a_2 = -\psi\\
b &= -\varphi, \quad b_1 = 1, \quad b_2 = \theta_1\\
c &= \psi, \quad c_1 = -\theta_1, \quad c_2 = 1
\end{aligned}
\right\} \qquad (1')
$$

и

$$
p = \theta_1', \quad q = \psi', \quad r = \varphi' \qquad (2')
$$

Теперь рассмотрим сначала случай, когда на корабль действуют только *вес* и *сила поддержания*. Тогда для такого приближения, которое характеризуется малыми колебаниями и принятием во внимание только *гидростатической* подъемной силы, будем иметь следующие уравнения качки корабля

$$
\frac{P}{g}\frac{d^2\xi_0}{dt^2} = 0, \quad \frac{P}{g}\frac{d^2\eta_0}{dt^2} = 0, \quad \frac{P}{g}\frac{d^2\zeta_0}{dt^2} = P - g\rho V \qquad (3)
$$

и

$$
\left.
\begin{aligned}
C\frac{dr}{dt} - E\frac{dp}{dt} &= \rho\int_V (Yx - Xy)\,dv = -g\rho\int_V (b_2 x - a_2 y)\,dv\\
B\frac{dq}{dt} &= \rho\int_V (Xz - Zx)\,dv = -g\rho\int_V (a_2 z - c_2 x)\,dv\\
A\frac{dp}{dt} - E\frac{dr}{dt} &= \rho\int_V (Zy - Yz)\,dv = -gr\int_V (c_2 y - b_2 z)\,dr
\end{aligned}
\right\} \qquad (4)
$$

где введены следующие обозначения: P — вес корабля, A, B, C — главные моменты инерции, $E = \Sigma mzx$ — один из трех центробежных моментов,

из которых два других исчезли, вследствие симметрии корабля, ρ — плотность воды и V — погруженный в данный момент времени t объем.

Принимая во внимание зависимости (2′), эти уравнения получат форму

$$\frac{P}{g}\frac{d^2\xi_0}{dt^2}=0, \quad \frac{P}{g}\frac{d^2\eta_0}{dt^2}=0, \quad \frac{P}{g}\frac{d^2\zeta_0}{dt^2}+g\rho S_0\zeta_0=-g\rho S_0 l\psi \tag{3′}$$

$$\left.\begin{aligned} C\frac{d^2\varphi}{dt^2}-E\frac{d^2\theta_1}{dt^2}&=0\\ B\frac{d^2\psi}{dt^2}-P(R_0-a)\psi&=g\rho S_0 l\zeta_0\\ A\frac{d^2\theta_1}{dt^2}-P(r_0-a)\theta_1-E\frac{d^2\varphi}{dt^2}&=0 \end{aligned}\right\} \tag{4′}$$

где R_0 и r_0 — соответствующие метацентрические радиусы, a — возвышение центра тяжести корабля над его центром величины, S_0 — площадь ватерлинии и l — абсцисса центра тяжести этой площади.

Во многих случаях, когда плоскость zy также может быть принята за плоскость симметрии корабля, последние уравнения можно еще больше упростить. В этом случае будем иметь: $E=0$ и $l=0$. При таком допущении решения уравнений (3′) и (4′) при соответствующем выборе начальных условий будут

$$\xi_0=0, \quad \eta_0=0, \qquad \zeta_0=H\cdot\cos\frac{2\pi t}{T_3}$$

$$\psi=\Psi_0\cdot\cos\frac{2\pi t}{T_2}, \qquad \theta_1=\Theta_0\cdot\cos\frac{2\pi t}{T_1}$$

где периоды T_1, T_2, T_3 имеют следующие значения

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{A}{P(r_0-a)}}, \quad T_2=2\pi\sqrt{\frac{B}{P(R_0-a)}}, \quad T_3=2\pi\sqrt{\frac{P}{g}\cdot\frac{1}{g\rho S_0}}$$

Полученные формулы показывают, что в этом случае главные виды качки — боковая, килевая и всплывание — совершаются независимо друг от друга подобно колебаниям маятников.

с. Учет сопротивления воды. Влияние сопротивления воды удобнее всего исследовать при *боковой качке*, где это сопротивление можно легко определить опытным путем. Тогда из системы формул (4′) принимается во внимание только последнее уравнение, где опять-таки E может быть принято равным 0.

Если *сопротивление принять пропорциональным первой степени скорости качки* и если вместо θ_1 напишем θ, то указанное уравнение примет вид

$$A\theta''+N\theta'+P(r_0-a)\theta=0$$

Положим

$$\frac{N}{A}=2h \quad \text{и} \quad \frac{P(r_0-a)}{A}=n^2$$

Тогда предыдущее уравнение получает удобную форму (5)

$$\theta + 2h\theta' + n^2\theta = 0$$

откуда при начальных условиях $\theta = \Theta_0$ и $\theta' = 0$ (при $t = 0$) получим решение

$$\theta = \Theta_0 e^{-ht}\left(\cos n_1 t + \frac{h}{n_1}\sin n_1 t\right) \tag{6}$$

где

$$n_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \sqrt{n^2 - h^2}$$

Это уравнение показывает, что амплитуда колебания уменьшается в геометрической прогрессии. Отсюда вытекает следующая *формула для погашения размахов качки*

$$\theta_{m+1} - \theta_m = -a\theta_m = -\left(1 - e^{-\frac{hT_1}{2}}\right)\theta_m \tag{7}$$

в которой θ_m есть амплитуда m-го размаха.

Если *сопротивление принять пропорциональным второй степени скорости качки*, то будем иметь уравнение

$$A\theta'' + P(r_0 - a)\theta = \pm K\theta'^2 \tag{8}$$

где знак минус берется в том случае, когда $\theta' > 0$, а знак плюс, когда $\theta < 0$. Интегрируя это уравнение по данному С. Д. Пуассоном[1] способу последовательных приближений, получим при тех же начальных условиях, что и выше

$$\theta = \left(\Theta_0 - \frac{2}{3}k\Theta_0^2\right)\cos nt + \frac{k\Theta_0^2}{2}\left(1 + \frac{1}{3}\cos 2nt\right) \tag{9}$$

где

$$k = \frac{K}{A} \quad \text{и} \quad n^2 = \frac{P(r_0 - a)}{A}$$

Из этой формулы вытекает следующий *закон погашения* размахов качки:

$$\theta_{m+1} - \theta_m = -\frac{4}{3}k\theta_m^2 \tag{10}$$

Если закон сопротивления состоит из двух членов обоих рассматриваемых видов, то соответствующая формула закона погашения будет

$$\theta_{m+1} - \theta_m = -(a\theta_m + b\theta_m^2) \tag{11}$$

где

$$a = 1 - e^{-\frac{hT_1}{2}} \quad \text{и} \quad b = \frac{2}{3}ke^{-\frac{hT_1}{2}}\left(1 + e^{-\frac{hT_1}{2}}\right) \tag{12}$$

---

[1] S. D. Poisson. Traité de mécanique, § 189.

Период T_1 боковой качки корабля и закон погашения определяются с помощью *опытного качания*. Это испытание состоит в том, что корабль на тихой воде раскачивается перебеганием команды с одного борта к другому, после чего производится наблюдение над углами наклонения и отмечается время.

Если обводы шпангоутов — острые или при круглых обводах корабль имеет большие боковые кили, то сопротивление воды пропорционально второй степени угловой скорости качки. В этом случае можно определить закон погашения для корабля с помощью *опыта с его моделью*. Представим себе модель, которая подобна кораблю не только геометрически, но и динамически. Для этого необходимо, чтобы вес корабля относился к весу модели как $1:\lambda^3$, моменты инерции относительно продольной оси относились бы, как $1:\lambda^5$, где $1:\lambda$ — отношение линейных размеров, и чтобы положение центра тяжести модели соответствовало центру тяжести корабля. Если положить сначала сопротивление воды пропорциональным n-й степени линейной скорости соответствующего элемента поверхности, то момент этой силы относительно продольной оси корабля будет пропорционален n-й степени угловой скорости и, следовательно, будет иметь вид: $K\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^n$. Для модели сопротивление выразится в таком же виде, надо лишь величину K помножить на $\frac{1}{\lambda^3}\left(\frac{1}{\lambda}\right)^n=\frac{1}{\lambda^{3+n}}$. Уравнение качки корабля будет

$$A\frac{d^2\theta}{dt^2}+P(r_0-a)\theta=K\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^n \tag{13}$$

Если время t_1 измерить в другой масштабной единице, которая будет относиться к единице времени корабля, как $1:\tau$, то получим уравнение

$$\frac{A}{\lambda^5}\frac{d^2\theta}{dt_1^2}\tau^2+\frac{P}{\lambda^3}\frac{r_0-a}{\lambda}\theta=\frac{K}{\lambda^{3+n}}\left(\frac{d\theta}{dt_1}\right)^n\cdot\tau^n \tag{14}$$

Для того чтобы движение модели было подобно движению корабля, т. е. в соответствующие моменты времени t_1 модель имела бы те же углы наклонения θ, как и корабль, необходимо, чтобы имели место соотношения

$$\frac{\tau^2}{\lambda^5}=\frac{1}{\lambda^4}=\frac{\tau^n}{\lambda^{3+n}}$$

откуда следует

$$\tau=\lambda^{\frac{1}{2}} \quad \text{и} \quad n=2 \tag{15}$$

Следовательно, колебания модели будут подобны колебаниям корабля только при квадратичном законе сопротивления, и лишь в этом случае

может быть использован для корабля закон погашения колебаний, наблюденный при испытании его модели.

d. Вынужденные колебания (корабль на волнении). Теория боковой качки Фруда. Если мы примем предположения Фруда (ср. п. **4a**), то боковая качка может быть выражена с помощью уравнения

$$A\frac{d^2\theta_1}{dt^2}+P(r_0-a)\theta_1=P(r_0-a)\Theta_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}-M_W \tag{16}$$

Здесь Θ_0 — максимальный угол склона волны, τ — период волны и M_W — момент сопротивления воды.

Рассмотрим сначала *боковую качку без сопротивления*, т. е. при $M_W=0$; тогда θ_1 будет

$$\theta_1=C_1\cos nt+C_2\sin nt+\frac{n^2}{n^2-\frac{4\pi^2}{\tau^2}}\Theta_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}$$

или если вместо n введем соответствующее значение периода

$$T_1=\frac{2\pi}{n}=2\pi\sqrt{\frac{A}{P(r_0-a)}}$$

то получим для $\tau\neq T_1$

$$\theta_1=C_1\cos\frac{2\pi t}{T_1}+C_2\sin\frac{2\pi t}{T_1}-\frac{\tau^2}{T_1^2-\tau^2}\Theta_0\sin\frac{2\pi t}{\tau} \tag{17}$$

и для $\tau=T_1$

$$\theta_1=C_1\cos\frac{2\pi t}{T_1}+C_2\sin\frac{2\pi t}{T_1}-\frac{\pi}{T_1}t\Theta_0\cos\frac{2\pi t}{\tau} \tag{18}$$

Здесь C_1 и C_2 — две произвольные постоянные, которые определяются из начальных условий. Формулы (17) и (18) оценивают влияние, оказываемое совпадением периодов собственных и вынужденных колебаний на боковую качку корабля, и определяют возрастание амплитуды, которое при этом имеет место. Фруду удалось даже опрокинуть на синхронных волнах модели с округленными обводами, которые оказывали незначительное сопротивление колебаниям. Далее Фруд показывает в формуле (17), что боковая качка корабля состоит из наложения двух простых колебаний, из которых одно имеет период T_1, другое — τ.

Если положим *сопротивление воды* пропорциональным скорости, то

$$M_W=N\frac{d\theta}{dt}$$

Введя следующие обозначения

$$\frac{N}{A}=2h,\quad n_1=\sqrt{n^2-h^2},\quad p=\frac{2\pi}{\tau}$$

$$M=\frac{n^2-p^2}{(n^2-p^2)^2+4h^2p^2}n^2\Theta_0\quad\text{и}\quad N=-\frac{2hp}{(n^2-p^2)^2+4h^2p^2}n^2\Theta_0$$

получим решение

$$\theta_1 = e^{-ht}(C_2 \cos n_1 t + C_2 \sin n_1 t) + M \sin \frac{2\pi t}{\tau} + N \cos \frac{2\pi t}{\tau}$$

Эта формула будет более наглядной, если представить ее в таком виде

$$\theta_1 = Ce^{-ht} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1} + \beta\right) + H \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau} + \gamma\right) \tag{19}$$

где

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}, \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{C_1}{C_2}$$

$$H = \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_1^2}{\tau^2}\right)^2 + k^2 \frac{T_1^2}{\tau^2}}} \Theta_0, \quad \operatorname{tg}\gamma = \frac{M}{N}$$

и

$$k^2 = \frac{h^2 T_1^2}{\pi^2}$$

Формула (19) показывает, что „свободные“ колебания погашаются, так что с течением времени остаются только „вынужденные“ колебания. Коэффициент погашения k является настолько малой дробью, что в тех случаях, когда отношение $\frac{T_1}{\tau}$ заметно отличается от единицы, в первом приближении можно пренебречь членом $k^2 \frac{T_1^2}{\tau^2}$ в выражении для H. При этом последний член в формуле (19) переходит в последний член формулы (17). Но если названное отношение приближается к 1, то H приближается к значению $\frac{\Theta_0}{k}$ и будет тем больше, чем меньше k.

Для океанской волны Θ_0 составляет около 8°. Если при этом отношение $\frac{T_1}{\tau} > 2$, то H будет $< 2.3°$, следовательно боковая качка будет весьма незначительной. Период τ, который зависит от длины волн, определяется формулой

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}$$

Таким образом, при длине волны $\lambda = 120$ м, τ получается равным 8.7 сек. Такие волны соответствуют уже весьма сильной мертвой зыби. Таким образом, если корабль имеет период в 18 сек., то он никогда не будет иметь боковой качки или же будет иметь очень плавную качку с незначительной амплитудой. Эти результаты, которые вообще получаются из общих свойств вынужденных колебаний, соответствуют действительности.

е. Теория килевой качки А. Н. Крылова. В отличие от боковой качки, предположения Фруда при килевой качке и при рассмотрении общей теории качки корабля на волнении не могут быть использованы. Они могут быть здесь заменены следующим предположением: допустим, что находящийся на волнах корабль в каждой точке своей поверхности

испытывает гидродинамическое давление, которое в рассматриваемое мгновение действует в соответствующей точке волны. Это допущение, которое является расширением закона Архимеда, произвольно в том отношении, что при нем не учитывается то, что корабль нарушает динамическую структуру волны. Далее возьмем океанскую мертвую зыбь, как подчиняющуюся закону трохоидальных волн, которые характеризуются следующей системой уравнений

$$\left.\begin{aligned} \xi - a &= re^{-\frac{2\pi c}{\lambda}} \sin 2\pi\left(\frac{a}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right) \\ \zeta - c &= re^{-\frac{2\pi c}{\lambda}} \cos 2\pi\left(\frac{a}{\lambda} - \frac{t}{\tau}\right) \\ p - p_0 &= g\rho\left\{c - \frac{\pi r^2}{\lambda}\left(1 - e^{-\frac{4\pi c}{\lambda}}\right)\right\} \end{aligned}\right\} \qquad (20)$$

где ζ и ξ — координаты частицы воды с центром колебания в точке (a, c); r — полувысота волны; λ — длина волны и τ — период волны.

Если рассмотреть случай килевой качки совместно с всплыванием при движении корабля в разрез волне, то можно поступить следующим образом.[1]

Применяя прежние обозначения (п. **4е**) и учитывая, что в данном случае дело идет только о величинах ζ_0 и ψ, получим уравнения движения корабля в следующем виде

$$\left.\begin{aligned} \frac{P}{g}\frac{d^2\zeta_0}{dt^2} &= P - \int_S p\cos(n\zeta)\,ds - W_\zeta \\ B\frac{d^2\psi}{dt^2} &= -\int_S p\,[x\cos(nz) - z\cos(nx)]\,ds - M_W \end{aligned}\right\} \qquad (21)$$

где n — направление соответствующей нормали к поверхности S корабля, p — гидродинамическое давление, W_ζ и M_W — сопротивление воды и его момент относительно оси y, а интегрирование распространяется на всю погруженную в данный момент времени t поверхность S корабля.

Входящие в уравнения (21) интегралы имеют неудобную для числовых расчетов форму, особенно если учесть, что поверхность корабля задается не математическим уравнением, а посредством чертежа корабля. Поэтому эти интегралы в практических целях должны быть преобразованы в более пригодную форму.

---

[1] A. Kriloff. A new theory of the pitching motion. Trans. Inst. Nav. Arch., 37 (1896) = Bull. de l'Assoc. techn. maritime, 1895, n° 4; C. R., 122 (1896), Paris, p. 183. Будет опубликовано в т. XI Собрания трудов.

Сначала поверхностные интегралы можно известным образом преобразовать в объемные

$$\left.\begin{aligned}\int_S p\cos(n\zeta)\,ds &= \int_V \frac{\partial p}{\partial \zeta}\,dV\\ \int_S p\,[x\cos(nz)-z\cos(nx)]\,ds &= \int_V \left(x\frac{\partial p}{\partial z}-z\frac{\partial p}{\partial x}\right)dV\end{aligned}\right\} \tag{22}$$

после чего попытаться в правых интегралах удержать только относительные координаты. Здесь нужно обратить внимание на то, что

$$\frac{\partial p}{\partial \xi}=\frac{2\pi}{\lambda}g\rho\,(\xi-a) \quad \text{и} \quad \frac{\partial p}{\partial \zeta}=g\rho\left\{1+\frac{2\pi}{\lambda}(\zeta-c)\right\} \tag{23}$$

и что с помощью этих уравнений мы легко можем выразить $\frac{\partial p}{\partial x}$ и $\frac{\partial p}{\partial z}$, если примем во внимание соотношения (1′) ($\theta_1=0$, $\varphi=0$ и что ψ на практике составляет максимально 5—6°, т. е. является „малым“).

После этого, наряду с x и z (если ξ и ζ также будут выражены через x и z), в интегралах уравнений (22) встретятся еще переменные a, c, которые, однако, легко могут быть найдены из зависимостей (20) с помощью преобразованной формулы Лагранжа. В самом деле $(\xi-a)$ и $(\zeta-c)$ получаются в форме степенного ряда от $\frac{r}{\lambda}$

$$\left.\begin{aligned}\frac{2\pi}{\lambda}(\xi-a)&=\frac{2\pi r}{\lambda}e^{-\frac{2\pi\zeta}{\lambda}}\sin 2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda}-\frac{t}{\tau}\right)+\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^3 e^{-\frac{6\pi\zeta}{\lambda}}(\ \ )+\ldots\\ \frac{2\pi}{\lambda}(\zeta-c)&=\frac{2\pi r}{\lambda}e^{-\frac{2\pi\zeta}{\lambda}}\cos 2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda}-\frac{t}{\tau}\right)+\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^2 e^{-\frac{4\pi\zeta}{\lambda}}(\ \ )+\ldots\end{aligned}\right\} \tag{24}$$

Для свободной поверхности, где $c=0$, мы получаем

$$\zeta_1=r\cdot\cos 2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda}-\frac{t}{\tau}\right)+\frac{\pi r^2}{\lambda}\left\{1-\cos 4\pi\left(\frac{\xi}{\lambda}-\frac{t}{\tau}\right)\right\}+\ldots \tag{25}$$

Значение $\frac{r}{\lambda}$ для самых крутых волн мертвой зыби не превосходит $\frac{1}{40}$, так что в предыдущих формулах (24) и (25) достаточно удержать только первый член.

При дальнейшем преобразовании интегралов (22) следует иметь в виду, что в каждое мгновение погруженный объем V может быть разложен на две части: 1) на объем V_0, который заключается между килем корабля и ватерлинией, соответствующей его положению равновесия, 2) на изменяющийся объем v, который заключается между этой ватерлинией и свободной поверхностью воды. Объем v будет функцией величин ζ_0, ψ и z, которые здесь рассматриваются все как малые, и так как v исчезает вместе с этими величинами, то в его выражении не будет ни одного члена, от них не зависящего. Это обстоятельство упрощает интегрирование, так как с самого начала можно пренебречь всеми членами высшего

порядка. Далее при интегрировании борта корабля вблизи ватерлинии можно в первом приближении рассматривать, как перпендикулярные к ней. Таким образом, после некоторых преобразований мы получаем дифференциальные уравнения (21), в которых введено еще пропорциональное первой степени скорости сопротивление воды, в таком виде

$$\left.\begin{aligned} &\frac{P}{g}\frac{d^2\zeta_0}{dt}+N\frac{d\zeta_0}{dt}+g\rho S_0\zeta_0= \\ &\qquad =g\rho r\left(m_0\cos\frac{2\pi t}{\tau}+n_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right)+g\rho\psi S_0 l \\ &B\frac{d^2\psi}{dt^2}+N_1\frac{d\psi}{dt}+P(R_0-a)\psi= \\ &\qquad =g\rho r\left(m_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}+n_1\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right)+g\rho S_0 l\zeta_0 \end{aligned}\right\} \qquad (26)$$

При этом входящие в уравнения постоянные имеют нижеследующие значения, которые непосредственно могут быть вычислены по теоретическому чертежу корабля

$$\left.\begin{aligned} &S_0=2\int_{-L_1}^{L_2} y_0\,dx=\text{площадь ватерлинии} \\ &S_0 l=2\int_{-L_1}^{L_2} xy_0\,dx=\text{момент } S_0 \text{ относительно оси } y \\ &m_0=a_0-\frac{2\pi}{\lambda}A_0, \qquad n_0=b_0-\frac{2\pi}{\lambda}B_0 \\ &m_1=a_1-\frac{2\pi}{\lambda}A_1, \qquad n_1=b_1-\frac{2\pi}{\lambda}B_1 \\ &a_0=2\int_{-L_1}^{L_2} y_0\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx, \qquad b_0=2\int_{-L_1}^{L_2} y_0\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\ &a_1=2\int_{-L_1}^{L_2} y_0 x\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx, \qquad b_1=2\int_{-L_1}^{L_2} y_0 x\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx \\ &A_0=2\int_{-L_1}^{L_2}\int_0^H e^{-\frac{2\pi z}{\lambda}}\,y\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx\,dz \\ &A_1=2\int_{-L_1}^{L_2}\int_0^H e^{-\frac{2\pi z}{\lambda}}\,yx\cos\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx\,dz \\ &B_0=2\int_{-L_1}^{L_2}\int_0^H e^{-\frac{2\pi z}{\lambda}}\,y\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx\,dz \\ &B_1=2\int_{-L_1}^{L_2}\int_0^H e^{-\frac{2\pi z}{\lambda}}\,yx\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx\,dz \end{aligned}\right\} \qquad (27)$$

причем L_1 и L_2 обозначают абсциссы носа и кормы, y_0 — ординату ватерлинии равновесия и y — ординату поверхности корабля, соответствующую координатам x и z, а H — углубление.[1]

При килевой качке и рыскании погашение свободных колебаний так значительно, что эти колебания не принимаются во внимание, и вся качка рассматривается, как состоящая только из вынужденных колебаний. Общее решение уравнений (26) имеет вид

$$\left.\begin{aligned}\zeta_0 &= e^{-ht}\left(C_1\cos\frac{2\pi t}{T_3}+C_2\sin\frac{2\pi t}{T_3}\right)+\alpha\cos\frac{2\pi t}{\tau}+\beta\sin\frac{2\pi t}{\tau}\\ \psi &= e^{-ht}\left(C_3\cos\frac{2\pi t}{T_2}+C_4\sin\frac{2\pi t}{T_2}\right)+\alpha_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}+\beta_1\sin\frac{2\pi t}{\tau}\end{aligned}\right\} \tag{28}$$

где α, β, α_1, β_1 имеют вполне определенные значения, а C_1, C_2, C_3, C_4 — произвольные постоянные; благодаря наличию члена e^{-ht} свободные колебания за очень короткое время исчезают, и остается лишь решение

$$\left.\begin{aligned}\zeta_0 &= \alpha\cos\frac{2\pi t}{\tau}+\beta\sin\frac{2\pi t}{\tau}\\ \psi &= \alpha_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}+\beta_1\sin\frac{2\pi t}{\tau}\end{aligned}\right\} \tag{29}$$

На численном примере может быть показано, что коэффициент сопротивления можно менять в очень больших пределах — почти от 0 до ∞ — без того, чтобы величины α, β; α_1, β_1 претерпели бы из-за этого заметное изменение, при условии что T_2 отлично от τ. Вследствие этого килевую качку можно рассчитать очень точно, несмотря на то, что сопротивление известно только с очень грубым приближением.

f. Общая теория колебаний корабля на волнах. Эта теория также была развита А. Крыловым,[2] как обобщение положений о килевой качке, данных в предыдущем п. **4e**. Если ограничиться первым приближением, то уравнения движения [ср. выше (3) и (4)] примут здесь вид

$$\left.\begin{aligned}&\frac{P}{g}\frac{d^2\xi_0}{dt^2}=\Sigma\Xi, \qquad \frac{P}{g}\frac{d^2\eta_0}{dt^2}=\Sigma H, \qquad \frac{P}{g}\frac{d^2\zeta_0}{dt^2}=\Sigma Z\\ &A\frac{d^2\theta_1}{dt^2}=\Sigma(yZ-zY), \quad B\frac{d^2\psi}{dt^2}=\Sigma(zX-xZ), \quad C\frac{d^2\varphi}{dt^2}=\Sigma(xY-yX)\end{aligned}\right\} \tag{30}$$

---

[1] В названной выше работе А. Крылова приводится полностью проработанный пример со всеми схемами, служащими для численного расчета коэффициентов.

[2] A. Kriloff. A general theory of the oscillations of a ship on waves. Trans. Inst. Nav. Archit., 40 (1898) = Bull. de l'Assoc. techn. maritime, 1897, № 8. Будет опубликовано в т. XI Собрания трудов.

где Ξ, H, Z — составляющие действующих сил по направлениям неподвижных осей ξ, η, ζ; X, Y, Z — соответствующие составляющие по направлениям относительных координатных осей. В качестве действующих сил опять фигурируют: 1) собственный вес корабля, 2) переменная сила поддержания, 3) сопротивление воды колебательным движениям корабля. Предполагается, что корабль расположен под углом α против волн, и сначала рассматривается корабль без хода.

Теперь решающим является вычисление силы поддержания. Здесь можно было бы действовать по аналогии с общими расчетами в п. 4. Однако для расчета удобнее — так как должно быть дано только первое приближение — заранее отбросить некоторые пренебрежимые величины, допустимость чего для случая килевой качки была доказана в предыдущем расчете.

Для этого воспользуемся следующим соображением: сила поддержания, действующая на элемент объема, определяется на основании гидродинамических уравнений тремя нижеследующими компонентами, соответствующими элементу массы $\rho d\tau$

$$\rho\left(X' - \frac{d^2\xi}{dt^2}\right)d\tau, \quad \rho\left(Y' - \frac{d^2\eta}{dt^2}\right)d\tau, \quad \rho\left(Z' - \frac{d^2\zeta}{dt^2}\right)d\tau$$

Из теории трохоидальных волн известно, что эта сила поддержания направлена по нормали к соответствующей динамической поверхности уровня и ее интенсивность выражается длиной этой нормали, при условии, что радиус катящегося круга представляет силу веса. Сделаем теперь относительно этих волн упрощающее предположение, позволяющее вычислить простым способом длину нормали. Так как углубление корабля мало по отношению к волнам, то допустим, что поверхности уровня трохоидальных волн параллельны свободной поверхности. Далее в качестве формы этой поверхности можно в первом приближении выбрать синусоидальную волну, уравнение которой будет

$$\left.\begin{aligned} \zeta_1 &= r\cos 2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda_1} + \frac{\eta}{\lambda_2} - \frac{t}{\tau}\right) \\ \text{или короче} \qquad \zeta_1 &= r\cos U \end{aligned}\right\} \tag{31}$$

Здесь

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{\cos\alpha}, \qquad \lambda_2 = \frac{\lambda}{\sin\alpha}$$

При этих допущениях вычисление силы поддержания производится следующим образом: сначала определяются направляющие косинусы нормали n к поверхности воды посредством следующих выражений

$$\left.\begin{aligned} &\cos(n\xi) = -\frac{2\pi r}{\lambda_1 N}\sin U, \quad \cos(n\eta) = -\frac{2\pi r}{\lambda_2 N}\sin U \\ &\cos(n\zeta_1) = -\frac{1}{N} = -\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\pi r}{\lambda}\sin U\right)^2}} \end{aligned}\right\} \tag{32}$$

Так как здесь $\frac{2\pi r}{\lambda} < \frac{1}{7}$ и поэтому в первом приближении может рассматриваться как малая величина, то по упрощении выражения (32) примут вид

$$\left.\begin{aligned} &\cos(n\xi) = -\frac{2\pi r}{\lambda_1}\sin U, \quad \cos(n\eta) = -\frac{2\pi r}{\lambda_2}\sin U \\ &\cos(n\zeta_1) = -1 \end{aligned}\right\} \tag{32'}$$

Если R — радиус катящегося круга, то длина нормали к поверхности воды будет

$$n = R + r\cos U = R\left(1 + \frac{2\pi r}{\lambda}\cos U\right) \tag{33}$$

При этом составляющие силы поддержания будут

$$\left.\begin{aligned} \rho\left(X' - \frac{d^2\xi}{dt^2}\right)dv &= g\rho\left(1 + \frac{2\pi r}{\lambda}\cos U\right)\cos(n\xi)\,dv = \\ &= -\frac{2\pi r}{\lambda_1} g\rho \sin U dv \\ \rho\left(Y' - \frac{d^2\eta}{dt^2}\right)dv &= g\rho\left(1 + \frac{2\pi r}{\lambda}\cos U\right)\cos(n\eta)\,dv = \\ &= -\frac{2\pi r}{\lambda_2} g\rho \sin U dv \\ \rho\left(Z' - \frac{d^2\zeta_1}{dt^2}\right)dv &= g\rho\left(1 + \frac{2\pi r}{\lambda}\cos U\right)\cos(n\zeta_1)\,dv = \\ &= -g\rho\left(1 + \frac{2\pi r}{\lambda}\cos U\right)dv \end{aligned}\right\} \tag{34}$$

Если принять во внимание уравнения, связывающие абсолютные и относительные координаты

$$\left.\begin{aligned} \xi &= \xi_0 + x - y\varphi + z\psi \\ \eta &= \eta_0 + x\varphi + y - z\theta_1 \\ \zeta_1 &= \zeta_0 - x\psi + y\theta_1 + z \end{aligned}\right\} \tag{35}$$

и учесть, что $\frac{2\pi\xi_0}{\lambda}$, $\frac{2\pi\eta_0}{\lambda}$, $\frac{2\pi\zeta_0}{\lambda}$ являются малыми величинами первого порядка и что $\sin U$, так же как и $\cos U$, повсюду умножаются на $\frac{2\pi r}{\lambda}$ или еще более малые величины $\frac{2\pi r}{\lambda_1}$ и $\frac{2\pi r}{\lambda_2}$, то U можно представить в таком виде

$$U=2\pi\left(\frac{x}{\lambda_1}+\frac{y}{\lambda_2}-\frac{t}{\tau}\right) \tag{36}$$

Отсюда значение полной силы поддержания, действию которой подвергается корабль в рассматриваемый момент, определяется следующими выражениями

$$\left.\begin{aligned} Q_\xi &= -\frac{2\pi r}{\lambda_1}g\rho\int_V \sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda_1}+\frac{y}{\lambda_2}-\frac{t}{\tau}\right)dv \\ Q_\eta &= -\frac{2\pi r}{\lambda_2}g\rho\int_V \sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda_1}+\frac{y}{\lambda_2}-\frac{t}{\tau}\right)dv \\ Q_\zeta &= g\rho V+\frac{2\pi r}{\lambda}g\rho\int_V \cos 2\pi\left(\frac{x}{\lambda_1}+\frac{y}{\lambda_2}-\frac{t}{\tau}\right)dv \end{aligned}\right\} \tag{37}$$

Дальнейшая обработка встречающихся в формулах (37) интегралов аналогична предшествующей (ср. **4е**). Снова объем V разлагается на V_0+v, где v есть „малая“ величина. Так как z_1, согласно формуле (31), определяется выражением

$$z_1=-\zeta_0+x\psi-y\theta_1+r\cos\left(\frac{x}{\lambda_1}+\frac{y}{\lambda_2}-\frac{t}{\tau}\right)$$

то будет, например,

$$V=\int_V dv=V_0+v=$$

$$=V_0-\int_{-L_1}^{L_2}dx\int_{-y_0}^{y_0}\left\{-\zeta_0+x\psi-y\theta_1-r\cos\left(\frac{x}{\lambda_1}+\frac{y}{\lambda_2}-\frac{t}{\tau}\right)\right\}dy$$

где L_1, L_2, y_0 имеют прежние значения. Отсюда находим

$$V=V_0+\zeta_0 S_0-\psi S_0 l-r\left(a_0\cos\frac{2\pi t}{\tau}+b_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right) \tag{38}$$

где S_0 и l имеют прежнее значение, а a_0 и b_0 выражаются следующим образом

$$\left.\begin{aligned} a_0 &= \frac{\lambda_2}{\pi}\int_{-L_1}^{+L_2} \sin\frac{2\pi y_0}{\lambda_2}\cos\frac{2\pi x}{\lambda_1}\,dx \\ b_0 &= \frac{\lambda_2}{\pi}\int_{-L_1}^{+L_2} \sin\frac{2\pi y_0}{\lambda_2}\sin\frac{2\pi x}{\lambda_1}\,dx \end{aligned}\right\} \tag{39}$$

В большинстве встречающихся на практике случаев выражения a_0 и b_0 упрощаются. Так как $\lambda_2 > \lambda$ и $2y_0 < B$, где B означает наибольшую ширину корабля, то

$$\frac{2\pi y_0}{\lambda_2} < \frac{\pi B}{\lambda}$$

Для больших кораблей, у которых B около 20 м, на больших волнах, длина которых λ около 120 м, будем иметь

$$\frac{2\pi y_0}{\lambda_2} < 0.6$$

т. е. синус угла будет отличаться от самого угла меньше, чем на $4^0/_0$, так что можно положить

$$\sin\frac{2\pi y_0}{\lambda_2} = \frac{2\pi y_0}{\lambda_2}, \quad \cos\frac{2\pi y_0}{\lambda_2} = 1 - \left(\frac{2\pi y_0}{\lambda_2}\right)^2$$

В связи с этим будем иметь выражения

$$a_0 = 2\int_{-L_1}^{+L_2} y_0\cos\frac{2\pi x}{\lambda_1}\,dx, \quad b_0 = 2\int_{-L_1}^{+L_2} y_0\sin\frac{2\pi x}{\lambda_1}\,dx \tag{39'}$$

которые переходят в соответствующие значения a и b в формуле (27) для $\alpha = 0$. Подобным же образом можно представить и все другие интегралы, входящие в выражение силы поддержания или ее моментов, в удобной для вычисления форме.

В результате мы будем иметь следующие *уравнения движения*

$$\left.\begin{aligned} \frac{P}{g}\frac{d^2\xi_0}{dt^2} &= -g\rho\frac{2\pi r}{\lambda_1}\left(B_0\cos\frac{2\pi t}{\tau} + A_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right) - W_\xi \\ \frac{P}{g}\frac{d^2\eta_0}{dt^2} &= -g\rho\frac{2\pi r}{\lambda_2}\left(B_0\cos\frac{2\pi t}{\tau} + A_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right) - W_\eta \\ \frac{P}{g}\frac{d^2\zeta_0}{dt^2} + g\rho S_0\zeta_0 &= g\rho\psi S_0 l + r\left(a_0\cos\frac{2\pi t}{\tau} + b_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right) - \\ &\quad - \frac{2\pi r}{\lambda}\left(A_0\cos\frac{2\pi t}{\tau} + B_0\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right) - W_\zeta \end{aligned}\right\} \tag{40}$$

и

$$\left.\begin{aligned} A\frac{d^2\theta_1}{dt^2}+P(r_0-a)\theta_1 &= \\ &= P(r_0-a)\Theta_0\sin\alpha\left(N_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}-M_1\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right)-L_W \\ B\frac{d^2\psi}{dt^2}+P(R_0-a)\psi &= \\ &= P(R_0-a)\Theta_0\cos\alpha\left(K_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}+L_1\sin\frac{2\pi t}{\tau}\right)+g\rho S_0 l\zeta_0-M_W \\ C\frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -P\Theta_0\left(P_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}+Q_1\cos\frac{2\pi t}{\tau}\right)-N_W \end{aligned}\right\} \quad (41)$$

Здесь a_0 и b_0 определяются формулами (39) и, соответственно, (39′) и подобно этому A_0, B_0, N_1, M_1, K_1, L_1, P_1, Q_1 — коэффициенты, которые могут быть вычислены по теоретическому чертежу корабля;[1] W_ξ, W_η, W_ζ, L_W, M_W, N_W — составляющие силы сопротивления и, соответственно, ее момента.

Если снова предположить, что сопротивление воды пропорционально скорости, то уравнения (40) и (41) станут подобны линейному уравнению (16) с постоянными коэффициентами и, благодаря этому, они могут быть легко проинтегрированы. Необходимо здесь учесть, что при килевой качке проистекающее от сопротивления погашение размахов так сильно, что свободные колебания совершенно не имеют места (ср. п. **4е**). Но при боковой качке этого никогда не бывает, потому что достаточно незначительной неравномерности мертвой зыби, т. е. незначительной разницы в элементах следующих друг за другом волн, для того, чтобы преодолеть погашение размахов и восстановить свободные колебания.[2]

Если, наконец, мы примем во внимание собственную скорость корабля, то достаточно будет только в предыдущих уравнениях вместо истинного периода τ волны ввести кажущийся период τ_1, который легко вычислить по следующей формуле

$$\tau_1=\frac{\tau}{1-\frac{c}{c_1}\cos\alpha} \quad (42)$$

где c — скорость корабля, c_1 — скорость распространения волн.

---

[1] В работе А. Крылова, наряду с выражениями для этих коэффициентов, имеется полное руководство для их вычисления, которое иллюстрируется на конкретном примере.

[2] Ср. с численным примером у А. Н. Крылова, который иллюстрирует это положение.

Таким образом, даны все элементы, которые до известной степени облегчают математическое изучение поведения корабля в море (на волнении) при заданной мертвой зыби и дают численное выражение влияния нагрузки или обводов корабля на его поведение в море.

g. Приборы для регистрации качки корабля. Регистрация качки на волнении может осуществляться фотографическим способом, с успехом применяемым до сих пор,[1] или с помощью прибора Фруда[2] и двойного осциллографа Бертена.[3] Так как этот последний прибор дает наиболее совершенные показания, то ниже будет дано его краткое описание.

Осциллограф Бертена состоит в основном из двух маятников. Один из них, который называется „малым маятником", имеет небольшой период качаний, приблизительно от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{2}$ сек., и такую форму, что свободные качания его быстро затухают.

Другой маятник, называемый „большим маятником", имеет весьма большой период качаний, приблизительно от 70 до 80 сек. Этот маятник состоит из почти совершенно уравновешенного обода диаметром в 120 см и около 200 кг весом. Ось этого обода очень точно сконструирована и покоится, в целях уменьшения трения, на роликовых подшипниках. Корпус, несущий оба маятника, снабжен часовым механизмом, передвигающим перед маятниками бумажную ленту, на которой автоматически, с помощью приделанных к маятникам отметчиков, регистрируются время и положения маятников. Прикрепленный к корпусу отметчик регистрирует среднюю линию; при прямом и спокойном положении корабля оба отметчика маятников отмечают эту же среднюю линию. Действие аппарата на волнении основано на следующих соображениях.

Ради простоты, предположим, что корабль идет лагом к волне, и, следовательно, происходит только чисто боковая качка. При этом, согласно теории Фруда, центр тяжести корабля описывает ту же круговую орбиту, как и частица воды, так что движение корабля может быть выражено следующими уравнениями

$$\left.\begin{aligned} \xi_0 &= 0, \quad \eta_0 = r\sin\frac{2\pi t}{\tau}, \quad \zeta_0 = r\cos\frac{2\pi t}{\tau} \\ \theta_1 &= \Theta_0\sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}+\alpha\right)+\Theta_1\sin\left(\frac{2\pi t}{T_1}+\beta\right) \end{aligned}\right\} \tag{43}$$

Пусть в точке (O, a, b) корабля (начало координат лежит в центре тяжести) подвешен маятник, который может качаться в плоскости

---

[1] А. Н. Крылов. О фотографической записи качаний корабля. Доклад в Морском техническом комитете, 1905. Прибор, предложенный А. Н. Крыловым, был одобрен Комитетом и с тех пор успешно применялся в нашем флоте при натурных испытаниях кораблей. — *Ред.*

[2] W. Froude. Description of an instrument for automatically recording the rolling of ships. Trans. Inst. Nav. Arch., 14 (1873).

[3] E. Bertin. Observations du roulis et du tangage exécutées avec l'oscillographe double. Mém. prés. div. sav., 26 (1878), Paris.

корабля zy. Если I_1 — его момент инерции относительно оси подвеса, m — его масса, l — расстояние его центра тяжести от точки подвеса, а ω — наклонение маятника по отношению к вертикали, то уравнение движения маятника будет

$$\left.\begin{aligned} I_1\omega'' = &-mlg\sin\omega + ml\{(\eta_0''\cos\omega + \zeta_0''\sin\omega) - \\ &-[a\sin(\theta_1-\omega)+b\cos(\theta_1-\omega)]\theta_1'' - [a\cos(\theta_1-\omega)+ \\ &+b\sin(\theta_1-\omega)]\theta_1'^2\} \end{aligned}\right\} \qquad (44)$$

В первом приближении здесь можно углы θ_1 и ω рассматривать как „малые“ и допустить, что точка подвеса маятника совпадает с центром тяжести; тогда предыдущее уравнение примет вид

$$I_1\omega'' + mgl\omega = ml\eta_0'' = -\frac{4\pi^2}{\tau^2}mlr\sin\frac{2\pi t}{\tau}$$

или, если положим $\frac{mgl}{I_1} = n^2$ и используем соотношение $\tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}$, то

$$\omega'' + n^2\omega = -\frac{2\pi r}{\lambda}n^2\sin\frac{2\pi t}{\tau}$$

откуда получим

$$\omega = C_1\cos\frac{2\pi t}{T} + C_2\sin\frac{2\pi t}{T} + \frac{2\pi r}{\lambda}\frac{\tau^2}{T^2-\tau^2}\sin\frac{2\pi t}{T} \qquad (45)$$

Здесь

$$T = \frac{2\pi}{n} = 2\pi\sqrt{\frac{I_1}{mgl}}$$

период колебания маятника.

Необходимо различать два случая: 1) период собственных качаний маятника весьма велик по сравнению с периодом волн и собственным периодом качки корабля T_1. Тогда вынужденные колебания маятника имеют очень небольшой множитель $\frac{\tau^2}{T^2-\tau^2}$. Они будут практически уже не заметны, если $\frac{\tau}{T}$ и $\frac{T_1}{T}$, приблизительно, равны 3 или 4. Если же маятник не испытывает начального толчка, то $C_1 = C_2 = 0$ и, следовательно, $\omega = 0$, т. е. маятник с длинным периодом не будет отклонен от вертикали, и его отметчик будет регистрировать истинные наклонения корабля. 2) Период собственных качаний маятника весьма мал по сравнению с периодом волн и собственным периодом корабля. Тогда множитель $\frac{\tau^2}{T^2-\tau^2}$ практически будет равен единице и в случае, если будет иметь место значительное погашение свободных колебаний, то из (45) получим

$$\omega = -\frac{2\pi r}{\lambda}\sin\frac{2\pi t}{\tau} \qquad (45')$$

Из формулы (32) видно, что теперь ω равно наклонению нормали к волновой поверхности и что, следовательно, малый маятник принимает это

направление. От более подробного исследования уравнения (44) мы здесь отказываемся. Само собой разумеется, что при втором приближении поведение большого маятника не изменится, зато поведение малого маятника будет находиться в сильной зависимости от положения точки подвеса на корабле и от колебания центра тяжести.

Упомянем здесь коротко также о гироскопическом приборе О. Шлика, принцип действия которого находится в тесной связи с вышеприведенными приборами. Здесь маятником служит тяжелый быстро вращающийся вокруг вертикальной оси маховик гироскопа. Подшипники вертикальной оси не связаны прочно с кораблем, а прикреплены к кольцу, вращающемуся вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной к продольной плоскости корабля. Эта последняя ось снабжена тормозом. Принцип действия прибора и предпринятые с ним опыты показали, что он даже при небольших размерах хорошо сохраняет положение своей оси в пространстве.[1]

5. Поворотливость корабля. Циркуляция

Если на находящемся в движении корабле переложить руль из среднего положения на борт, то возникнет сопротивление воды. Направление этой силы не проходит через центр тяжести корабля, и потому корабль придет во вращательное движение. Уравнения движения корабля с положенным на борт рулем были установлены еще Эйлером и применяются в следующей форме.

Пусть M — масса корабля, G — его центр тяжести, I — момент инерции массы корабля относительно вертикали Gz, P — действующая в продольной плоскости движущая сила, W_e и W_s — составляющие сопротивления в продольной плоскости и по нормали к ней, R — нормальное давление и F — сопротивление трения руля, α — угол перекладки руля, δ — угол дрейфа, φ — угол поворота корабля, ρ — радиус кривизны кривой, описываемой центром тяжести корабля, v — скорость корабля, E — момент сил R и F относительно Gz, M_w — момент силы сопротивления. Тогда уравнения движения будут выглядеть следующим образом

$$\left.\begin{aligned} \frac{Mv^2}{\rho}\sin\delta + M\frac{dv}{dt}\cos\delta &= P - W_e - R\sin\alpha - F\cos\alpha = 0 \\ \frac{Mv^2}{\rho}\cos\delta - M\frac{dv}{dt}\sin\delta &= W_s - R\cos\alpha + F\sin\alpha = 0 \\ I\frac{d^2\varphi}{dt^2} &= E - M_w \\ \frac{v}{\rho} = \frac{d\beta}{dt}, \quad \varphi &= \beta + \delta \end{aligned}\right\} \quad (46)$$

[1] O. Schlick. The gyroscopic effects of fly-wheels on board ship. Trans. Inst. Nav. Archit., 46 (1904), p. 117.

Угол φ отсчитывается от начального направления движения корабля, β — угол между первоначальным направлением и касательной в соответствующей точке кривой, описываемой центром тяжести корабля.

Эти уравнения устанавливаются при допущении, что корабль не увлекает за собой масс воды, что противоречит действительности. Однако каких-либо данных об этой массе и ее влиянии на исследуемые явления пока не имеется. Далее необходимо обратить внимание, что W_v, W_s, R и M_w являются функциями от v, δ, $\frac{d\varphi}{dt}$, которые при настоящем состоянии знаний могут быть установлены при весьма произвольных допущениях; вследствие этого решения уравнений (46), которые нетрудно получить с помощью этих допущений, едва ли могут иметь практическое значение.

6. Вибрация корабля

При вибрации корабля имеет место явление резонанса. Корабль рассматривается как большой упругий стержень. Этот стержень, в том случае, если на него не действуют никакие внешние силы, может воспроизводить только совершенно определенные нормальные или собственные колебания. Если машина не вполне уравновешена, то она действует на корабль как возмущающая сила, интенсивность которой периодически изменяется. Вследствие действия этой силы в корабле возникают вынужденные колебания; если период этой силы совпадает с одним из периодов собственных колебаний, то возникает резонанс. Колебания получают большую амплитуду, которая погашается только пассивным сопротивлением.

Теоретическое исследование этой вибрации требует интегрирования уравнения

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)+q\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}=F(x,\,t) \tag{47}$$

где E — модуль упругости материала корабля, I — момент инерции площади поперечного сечения, q — нагрузка на единицу длины, соответствующая абсциссе x, и $F(x, t)$ — возмущающая сила, также отнесенная к единице длины. Необходимо учитывать, что EI и q заданы графически, вследствие чего уравнение (47) может быть решено только посредством известного способа последовательных приближений.

Прежде всего должны быть установлены *свободные колебания*. Л. Гюмбель[1] дал для этого графический способ. Этот способ может быть аналитически представлен следующим образом: пусть $EI=f(x)$, тогда уравнение (47) для свободных колебаний будет

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(f(x)\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)+q(x)\frac{\partial^2 z}{dt^2}=0 \tag{48}$$

[1] L. Gümbel. Ebene Transversal schwingungen freier stabförmiger Körper mit variablem Querschnitt. Jahrb. der schiffsbautechn. Ges. 2 (1901), p. 211 ff.

В качестве граничных и начальных условий изберем следующие

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}=0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial^3 z}{\partial x^3}=0 \quad \text{при} \quad \begin{cases} x=0 \\ x=l \end{cases} \tag{49}$$

$$z=\varphi(x) \quad \text{и} \quad \frac{\partial z}{\partial t}=\psi(x) \quad \text{для} \quad t=0 \tag{50}$$

Будем искать решение в форме $z=\sum XT$, где X является функцией одного только x, а T — функция одного лишь t. Тогда для определения X и T получим следующие уравнения

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^4 T}{dt^4}+m^4 T&=0 \\ \frac{d^2}{dx^2}\left(f(x)\frac{d^2 X}{dx^2}\right)-m^4 q(x) X&=0 \end{aligned}\right\} \tag{51}$$

причем величины m определятся посредством известного трансцендентного уравнения

$$\varphi(m)=0 \tag{52}$$

которое получается из граничных условий. Пусть m_1, m_2, m_3 ... m_k — корни уравнения (52). Каждому корню m_k соответствует нормальное колебание X_k. Таким образом, будем иметь

$$z=\sum A_k X_k \cos m^2{}_k t+\sum B_k X_k \sin m^2{}_k t \tag{53}$$

Коэффициенты A_k и B_k определяются здесь с помощью так называемых ортогональных свойств функций

$$\int_0^l X_k X_j q(x)\,dx=0 \quad \text{для} \quad k\neq j \tag{54}$$

в форме

$$\left.\begin{aligned} A_k&=\frac{\int_0^l \varphi(x) X_k q(x)\,dx}{\int_0^l X_k^2 q(x)\,dx} \\ B_k&=\frac{1}{m_k^2}\frac{\int_0^l \psi(x) X_k q(x)\,dx}{\int_0^l X_k^2 q(x)\,dx} \end{aligned}\right\} \tag{55}$$

Этим все сводится к определению корней $m_1, \ldots m_k, \ldots$ и соответствующих им функций. Приближенное значение наименьшего корня m_1 можно получить заменой $f(x)$ и $q(x)$ их средними значениями, т. е.

$$\frac{1}{l}\int_0^l f(x)\,dx \quad \text{и} \quad \frac{1}{l}\int_0^l q(x)\,dx$$

Пусть μ представляет собой таким образом полученное значение m

$$\frac{d^2}{dx^2}\left(f(x)\frac{d^2X}{dx^2}\right)-\mu^4 q(x)\,X=0 \tag{56}$$

Так как это уравнение — линейное, то

$$X=C_1F_1(x)+C_2F_2(x)+C_3F_3(x)+C_4F_4(x)$$

где C — произвольные постоянные, в качестве которых можно принять значения

$$X, \quad \frac{dX}{dx}, \quad \frac{d^2X}{dx^2} \quad \text{и} \quad \frac{d^3X}{dx^3}$$

при $x=0$; тогда будем иметь

$$X=C_1F_1(x)+C_2F_2(x)$$

где

$$C_1=X(0), \quad C_2=\left(\frac{dX}{dx}\right)_{x=0}$$

$$F_1(0)=1, \quad F_1'(0)=0; \quad F_2(0)=1; \quad F_2'(0)=1$$

Вообразим теперь, что графически заданные кривые $f(x)$ и $q(x)$ заменены соответствующим образом ступенчатыми линиями, и выберем для X в промежутке от $x=ih$ до $x=(i+1)h$ значение $X_i=X(ih)$, соответствующее абсциссе ih с тем, чтобы ввести это значение во второй член уравнения (56), которое тогда будет иметь вид

$$\frac{d^4X}{dx^4}+\mu^4 g(ih)\,X(ih)=0 \tag{56'}$$

при этом $g(ih)=\frac{q(ih)}{f(ih)}$. Отсюда находим

$$\left.\begin{aligned}
X_{i+1}'''&=\mu^4 g(ih)\,X_i h+X_i'''\\
X_{i+1}''&=\mu^4 g(ih)\,X_i\frac{h^2}{2}+X_i''' h+X_i''\\
X_{i+1}'&=\mu^4 g(ih)\,X_i\frac{h^3}{6}+X_i'''\frac{h^2}{2}+X_i'' h+X_i'\\
X_{i+1}&=\mu^4 g(ih)\,X_i\frac{h^4}{24}+X_i'''\frac{h^3}{6}+X_i''\frac{h^2}{2}+X_i' h+X_i
\end{aligned}\right\} \tag{57}$$

С помощью этих формул выполняют переход от одного промежутка к следующему. Но так как $X_0 = C_1$ и $X_0' = C_2$, все эти значения будут иметь вид

$$M_{i+1} C_1 + N_{i+1} C_2$$

где M_{i+1} и N_{i+1} имеют совершенно определенные числовые величины.

Для $i = n$ имеем $X_n''' = X'''(l) = 0$ и $X_n'' = X''(l) = 0$, так что

$$X_n'' = MC_1 + NC_2 = 0$$
$$X_n''' = P_1 C_1 + Q_1 C_2 = 0$$

т. е. определитель $MQ_1 - NP_1$ должен обратиться в нуль. Если это случится, то μ будет действительным значением m_1; если этого не случится, то

$$\varphi(\mu) = MQ_1 - NP_1 \tag{58}$$

Хотя мы, таким образом, и не сможем построить трансцендентное уравнение $\varphi(m)$, но мы сумеем посредством указанного способа вычислить для каждого числового значения μ соответствующее значение $\varphi(m)$, а следовательно, определить последующие корни трансцендентного уравнения. При этом мы получаем изображение соответствующих функций X в виде таблицы. Практически достаточно вычислить для больших кораблей наименьший корень m_1, для быстроходных торпедных катеров — первые два корня m_1 и m_2. Значения этих двух корней определяют критические числа оборотов в минуту, при которых возникает резонанс

$$\frac{60}{2\pi} m_1^2 \quad \text{и} \quad \frac{60}{2\pi} m_2^2$$

Установление значений m_1 и m_2, ... и им соответствующих функций X_1, X_2, ... — хотя бы и в форме таблицы — достаточно также для того, чтобы определить вынужденные колебания в том случае, когда дана возмущающая сила $F(x, t)$. Это требует только квадратур, которые могут быть установлены с помощью известных формул последовательного приближения. Общий способ для однородных стержней разработан А. Крыловым;[1] этот способ пригоден также для стержня с переменным поперечным сечением в том случае, когда определены нормальные функции.

---

[1] A. Kriloff. Über die erzwungenen Schwingungen von gleichförmigen elastischen Stäben. Math. Ann., 61 (1905), p. 211. — А. Н. Крылов. Вибрация судов. Лекции, читанные на кораблестроительном отд. СПб Политехнического института (литогр. изд.), 1907. См. также Собрание трудов, т. X, 1948. — *Ред.*

С экспериментальным изучением вибрации корабля можно ознакомиться по О. Шлику,[1] который изобрел и построил применяемый для этого аппарат, названный им „паллографом“.

ЛИТЕРАТУРА[2]

Алымов И. П. Теория корабля. 2 тт., Кронштадт, 1884—1885.

Афанасьев В. И. Практические законы движения судов, в. 1—2. С.-Петербург, 1895.

Афанасьев В. И. Материалы к изучению движения судна. С.-Петербург, 1899.

Брикс Ф. А. О форме судов наименьшего сопротивления. Морской сборник, 1887, № 5.

Бубнов И. Г. Спуск судна на воду. Морской сборник, 1900, №№ 2, 3, 5 и 6.

Бубнов И. Г. О непотопляемости судов. Морской сборник, 1901, №№ 4 и 5.

Гамалея П. Я. Вышняя теория морскаго искуства. 4 тт., С.-Петербург, 1801—1804

Жуковский Н. Е. О форме судов. Труды отд. физических наук Общ. любителей естествознания, 1890, т. III, в. 1.

Жуковский Н. Е. О спутной волне. Труды отд. физ. наук Общ. любителей естествознания, 1909, т. XIV, в. 1 (Работа сообщена в Московск. мат. общ. 16 сентября 1903 г.).

Крылов А. Н. Эскадренный броненосец „Петропавловск“. Вычисление влияния затопления отделений на крен, диферент и остойчивость броненосца. С.-Петербург, б. г.

Крылов А. Н. Записки по теории корабля. С.-Петербург, 1903.

Крылов А. Н. Теория корабля, ч. I. С.-Петербург, 1907.

Крылов А. Н. Теория мореходных качеств корабля. С.-Петербург.

Кузьминский П. Д. Подводная поверхность, двигатель и движитель корабля в недалеком, вероятно, будущем. Морской сборник, 1899, № 9.

Макаров С. О. Броненосная лодка „Русалка“ (Исследование плавучести лодки и средства, предлагаемые для усиления этого качества). Морской сборник, 1870, №№ 3, 5 и 6.

Макаров С. О. О непотопляемости судов. Морской сборник, 1875, № 6.

Макаров С. О. Разбор элементов, составляющих боевую силу судов. С.-Петербург, 1894.

Менделеев Д. И. О сопротивлении жидкостей и воздухоплавании. С.-Петербург, 1880.

Окунев М. М. Теория и практика кораблестроения. 4 тт., С.-Петербург, 1865—1873.

Погодин А. Судовые движители. С.-Петербург, 1907.

Эйлер Л. Полное умозрение строения и вождения кораблей (перевод с фр. М. Головина). С.-Петербург, 1778.

Beafoy M. G. Nautical and hydraulic experiments. London, 1334.

Bouguer P. Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements. Paris, 1746.

Euler L. Scientia navalis, 2 vol., St.-Petersburg, 1749.

Euler L. Théorie complète de la construction et de la manoeuvre des vaisseaux. Paris, 1773.

---

[1] O. Schlick. On an apparatus for measuring and legisbering the vibrations of steamers. Trans. Inst. Nav. Archit 34 (1893), p. 167.

[2] Список литературы по 1907 г. составлен взамен опубликованного в „Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften“. — *Ред.*

Froude W. Experiments on surface friction experienced by a plan moving through water. Brit. Assoc. Rep., 1372.

Froude W. Experiments for the determination of the frictional resistance of water on a surface, under various conditions. Brit. Assoc. Rep., 1874.

Kriloff A. Nouvelle méthode du calcul des éléments d'une caréne. Bull, de l'Assoc. techn. maritime, 1893.

Kriloff. A. A new theory of the pitching motion of ships on waves. Trans. Inst. Nav. Archit., 37 (1896) = Théorie du tangage sur une mer houleuse. Bull. de l'Assoc. techn. maritime, 1896, N 4.

Kriloff A. A general theory of the oscillations of a ship on waves. Trans. Inst. Nav. Archit., 40 (1898) = Théorie générale des oscillations du navire sur une mer houleuse. Bull. de l'Assoc. techn. maritime 1897, N 8, 1901, N 12.

Pollard J. et A. Dudebout. Théorie du navire. 4 vols. Paris, 1890—1894.

Reed E. A treatise on the stability of ships. London, 1885.

Recueil des pièces, qui ont reporté le prix de l'Académie des sciences, t. 7 (1759), 8 (1771), Paris. (Эти два тома содержат представленные на конкурс работы Л. Эйлера — о напряжениях в частях корабля при боковой и килевой качке, Д. Бернулли — о боковой и килевой качке и пр.).

НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СУДНА[1]

Моя задача состоит в том, чтобы изложить здесь совокупность общих методов, применимых ко всем расчетам, которые приходится производить при разработке проекта корпуса корабля, а именно: вычисления водоизмещения, координат центра величины, возвышения большого и малого метацентров, исследования статической и динамической остойчивости на больших наклонениях и определение изгибающих моментов для положений корабля на гребне и подошве волны.

Практически обыкновенно довольствуются расчетом водоизмещения, координат центра величины и возвышения обоих метацентров над килем; остальные упомянутые выше расчеты производятся вследствие их трудоемкости лишь в редких случаях, хотя их важность неоспорима.

В настоящей статье я опишу *методы, применение которых для выполнения всех упомянутых расчетов требует времени и труда не более, чем это необходимо при определении водоизмещения, положения центра величины и обоих метацентров обычными способами.*

Известно, что все указанные расчеты в конце концов сводятся к отысканию приближенного значения некоторых определенных интегралов, простых или сложных. С этой целью в России и в Англии применяют формулу Симпсона, причем берут 21 поперечное сечение и от 7 до 11 горизонтальных сечений. Во Франции для того же числа ординат довольствуются формулой трапеций.

Сами собой возникают следующие вопросы:

Почему у нас берут 21 поперечное сечение и от 7 до 11 горизонтальных сечений?

В какой мере эти числа достаточны или необходимы?

Какова формула приближенных квадратур, которой надлежит пользоваться?

Каким образом выгоднее расположить вычисления?

---

[1] Перевод статьи, напечатанной в „Bulletin de l'Association technique maritime", (1893, t. 4).

Каким числом значащих цифр следует ограничиться?

Я не нашел ответа на эти вопросы ни в одном из руководств по теории корабля, которые мне известны; в большинстве из них довольствуются приведением примера, неудачно выбранного Ранкином, чтобы доказать точность формулы Симпсона (Ранкин вычисляет площадь четверти круга).

Итак, прежде чем излагать систему расчетов, необходимо установить их базу, и для этой цели я сформулирую следующим образом принципы всякого рода численных расчетов:

1. Точность вычисления должна соответствовать точности данных, которые получаются либо на основе наблюдения, либо непосредственным измерением; что касается точности этих последних, то она должна соответствовать той степени точности, которая требуется практикой от конечного результата.

2. Вычисления должны быть расположены таким образом, чтобы без ущерба для точности окончательного результата можно было сохранить минимум значащих цифр и ограничиться возможно меньшим количеством операций. Для этого вычисления следует расположить так, чтобы сложение и вычитание производились до умножения, которое должно предшествовать делению, и чтобы каждый раз сохранялись только цифры, строго необходимые.

3. Если необходимо определить разность двух чисел, которая мала сравнительно с ними, то следует вычислять ее непосредственно, избегая вычисления самих чисел.

4. Если желательно иметь последовательные значения переменной, мало разнящиеся между собой, то следует вычислить непосредственно только одно значение, прибавляя к нему необходимые поправки для получения других. Эти поправки должны вычисляться с тем меньшей точностью, чем они меньше по сравнению со значением переменной.

Эти принципы (настолько простые, что все их знают, хотя применяют их почти только одни астрономы) позволяют в значительной степени сокращать все вычисления в теории корабля.

Таким образом, первый вопрос, который надлежит нам разрешить, будет следующий: какова та точность, которая требуется в теории корабля?

Все данные для вычисления берутся из теоретических чертежей, которые выполняются в России и в Англии в масштабе $\frac{1}{48}$ (четверть дюйма на фут). Во Франции применяют масштаб $\frac{1}{100}$ для больших кораблей и $\frac{1}{66.6}$ — для средних кораблей. Ординаты снимаются с такого чертежа с помощью линейки, на которой нанесены четверти дюйма, причем каждая такая четверть, эквивалентная 1 футу, разделена на 10 частей. Таким образом, непосредственный отсчет дает футы и десятые фута, сотые доли оцениваются на-глаз, и, обыкновенно, довольствуются половиной десятой доли; таким образом, для большого корабля, шириной в 70 футов (21 м), будем

иметь для ординат *три* значащих цифры точных и четвертую сомнительную (например 34.65 фута $\pm$ 0.03 фута). На чертежах, выполненных в масштабе $\frac{1}{48}$, нельзя достичь бóльшей точности; толщина линий, деформации бумаги или полотна, субъективная ошибка и т. д. являются теми препятствиями, которых невозможно избежать. Итак, *все вычисления, базирующиеся на указанных чертежах, должны быть выполнены с 3 значащими цифрами точными и четвертой сомнительной.*

С этой точки зрения следует выбирать число ординат формулы квадратур, которой будем пользоваться, и самую формулу. Делая этот выбор, нужно помнить, что точность формул квадратур зависит не только от числа ординат, но также от формы (иначе говоря, от уравнения) кривой, площадь которой определяется; по этой именно причине я выше отметил, что пример Ранкина неудачен для представления о точности формулы Симпсона; в теории корабля мы не встречаемся ни с кругами, ни с эллипсами.

Все сечения подводной части корабля (по крайней мере те, которые принято теперь строить) весьма хорошо выражаются следующим общим уравнением *прогрессики* (см. Приложение 1-е):

$$y = a\,\frac{1-\left(\frac{x+h}{l+h}\right)^3}{1+k\left(\frac{x+h}{l+h}\right)^3}$$

Площадь этой кривой между какими-либо двумя ординатами легко вычисляется в конечной форме. Сравнивая площади этой кривой, вычисленные по точной и приближенной формулам, можно оценить степень точности последней для случаев, встречающихся в корабельной практике. Составляя проект крейсера, который требуется представлять на выпускных экзаменах в Морской академии, я выполнил все вычисления для главных сечений корабля: грузовой ватерлинии, миделя и типовых шпангоутов носовой и кормовой оконечности. Эти вычисления, извлечения из которых я привожу в Приложении, показали мне, что, беря 20 ординат и применяя правило Симпсона, мы получаем 4 точных цифры для площади ватерлинии и только 3 цифры — при 10 ординатах для сложных шпангоутов кормовой части.

Но почему пользоваться правилами Симпсона и трапеций лучше, чем всякими другими правилами, которые интегральное исчисление доставляет в столь обильном выборе?

Очевидно, что нужно брать ту формулу, которая быстрее всего приводит к цели. Из всех правил приближенных квадратур для одного и того же числа ординат правило Гаусса является наиболее точным. Оно требует специального распределения ординат (не равноотстоящих друг от друга), из которых каждая должна быть затем помножена на соответствующий

нерациональный множитель; сумма этих произведений, умноженная на основание, дает площадь кривой.

Формула Эрмита, почти такая же точная, как формула Гаусса, отличается от нее только тем, что для нее не требуется специальной таблицы для абсцисс и коэффициентов. Можно найти их вычисленными в готовом виде в таблице логарифмов для такого числа ординат, какое пожелаем.

Затем идет правило Котеса, которое требует только равноотстоящих друг от друга ординат в произвольном числе, причем множители, на которые умножаются эти ординаты, являются простыми дробями, но неудобными для оперирования с ними, в том случае, если число ординат более или менее значительно; например при 7 ординатах один из коэффициентов равен $\frac{3577}{17280}$, а при 10 ординатах мы встречаемся с такими коэффициентами, как $\frac{16067}{598752}$ и $-\frac{260550}{598752}$ и т. п. Правило Симпсона является лишь частным случаем формулы Котеса.

Формулой, применение которой является наиболее простым, а точность равна точности правила Котеса, является формула нашего знаменитого академика Чебышева. Ординаты распределены особым образом (не на равных расстояниях друг от друга); для вычисления площади кривой достаточно лишь умножить их среднее арифметическое значение на основание (см. Приложение).

Те же вычисления, что и для формулы Симпсона, показывают, что, беря 7 ординат, распределенных по Чебышеву по всей длине корабля, мы получаем площадь ватерлиний с достаточной точностью. Для шпангоутов достаточно 5 ординат. При 9 ординатах мы получаем 4 точных цифры.

Итак, для вычисления водоизмещения, положения центра величины и т. д. можно применять формулу Чебышева, беря 7 или 9 поперечных сечений и 5 горизонтальных сечений. Если бы мы пожелали иметь результаты повышенной точности (в этом случае мы должны были бы иметь теоретические чертежи в более крупном масштабе и вычерченные с чрезвычайной тщательностью), то следовало бы взять 9 поперечных сечений и 7 горизонтальных, что дало бы нам 4 точных цифры.

Другой формулой, удобной для вычисления и достаточно точной, является формула Радо. Она особенно пригодна для чертежей французских кораблей, которые, как правило, вычерчиваются с 21 вертикальным сечением и 10 горизонтальными, отстоящими друг от друга на равном расстоянии. Если носовой перпендикуляр обозначить номером 0, то возьмем 8 ординат со следующими номерами: 1, 4, 6, 9, 11, 14, 16, 19. Пусть y_1, y_4, y_6, ..., y_{16}, y_{19} суть эти ординаты; тогда площадь ватерлинии будет дана формулой Радо в виде

$$S = \frac{1}{2}(M_1 + M_2) + \frac{1}{90}(M_1 - M_2)$$

где

$$M_1 = \frac{1}{4}(y_4 + y_6 + y_{14} + y_{16})\,L$$

$$M_2 = \frac{1}{4}(y_1 + y_9 + y_{11} + y_{19})\,L$$

а L — длина между перпендикулярами. Для интегрирования этих площадей формула Чебышева является более предпочтительной.

При вычислении координат центра величины мы воспользуемся той же формулой Чебышева; при этом для согласования со вторым общим принципом возьмем в качестве плоскостей моментов миделевое сечение и плоскость ватерлинии, проходящей посредине осадки, а не носовой или кормовой перпендикуляры и грузовую ватерлинию, как это обыкновенно делается; тогда получим помещенную ниже таблицу, которую я привожу для наиболее сложного случая 9 и 7 сечений.

Вычисление водоизмещения

Длина корабля $L =$ Осадка $T =$

Ватерлинии \ Шпангоуты	Кормовая часть				⊠	Носовая часть				Суммы строк
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
	$x_9 = -x_1$	$x_8 = -x_2$	$x_7 = -x_3$	$x_6 = -x_4$	$x_5 = 0$	$x_4 =$	$x_3 =$	$x_2 =$	$x_1 =$	
I $z_1 =$	y_{19}	y_{18}	y_{17}	y_{16}	y_{15}	y_{14}	y_{13}	y_{12}	y_{11}	s_I
II $z_2 =$	y_{29}	y_{28}	y_{27}	y_{26}	y_{25}	y_{24}	y_{23}	y_{22}	y_{21}	s_{II}
III $z_3 =$	y_{39}	y_{38}	y_{37}	y_{36}	y_{35}	y_{34}	y_{33}	y_{32}	y_{31}	s_{III}
IV $z_4 = 0$	y_{49}	y_{48}	y_{47}	y_{46}	y_{45}	y_{44}	y_{43}	y_{42}	y_{41}	s_{IV}
V $z_5 = -z_3$	y_{59}	y_{58}	y_{57}	y_{56}	y_{55}	y_{54}	y_{53}	y_{52}	y_{51}	s_V
VI $z_6 = -z_2$	y_{69}	y_{68}	y_{67}	y_{66}	y_{65}	y_{64}	y_{63}	y_{62}	y_{61}	s_{VI}
VII $z_7 = -z_1$	y_{79}	y_{78}	y_{77}	y_{76}	y_{75}	y_{74}	y_{73}	y_{72}	y_{71}	s_{VII}
Суммы столбцов	s_9	s_8	s_7	s_6	s_5	s_4	s_3	s_2	s_1	S

Водоизмещение . . . . . $D = \frac{2LTS}{9 \cdot 7}$

Простота таблицы не вызывает необходимости в пояснениях; впрочем, в дальнейшем мы дадим численный пример. Непосредственно видны те видоизменения, которые должны быть сделаны, когда применяется меньшее число поперечных и горизонтальных сечений.

Для вычисления координат центра величины имеем нижеследующую таблицу:

Вычисление координат центра величины

I. Абсцисса центра величины					
Суммы столбцов носовой части	s_4	s_3	s_2	s_1	
Суммы столбцов кормовой части	s_6	s_7	s_8	s_9	
Разность между носовой и кормовой частями .	$s_4 - s_6$	$s_3 - s_7$	$s_2 - s_8$	$s_1 - s_9$	
Абсциссы x	x_4	x_3	x_2	x_1	Сумма моментов
Статические моменты .	$(s_4 - s_6)x_4$	$(s_3 - s_7)x_3$	$(s_2 - s_8)x_2$	$(s_1 - s_9)x_1$	M

Абсцисса центра величины $x_c = \frac{M}{S} =$

Эта абсцисса выражается в тех же единицах, что и абсциссы x_4, x_3,...

II. Ордината центра величины				
Сумма ординат верхних ватерлиний	s_{I}	s_{II}	s_{III}	
Сумма ординат нижних ватерлиний	s_{VII}	s_{VI}	s_{V}	
Разность	$s_{\mathrm{I}} - s_{\mathrm{VII}}$	$s_{\mathrm{II}} - s_{\mathrm{VI}}$	$s_{\mathrm{III}} - s_{\mathrm{V}}$	
Отстояние расчетных ватерлиний от IV ватерлинии	z_1	z_2	z_3	Сумма моментов
Статические моменты .	$(s_{\mathrm{I}} - s_{\mathrm{VII}})z_1$	$(s_{\mathrm{II}} - s_{\mathrm{VI}})z_2$	$(s_{\mathrm{III}} - s_{\mathrm{V}})z_3$	N

Возвышение z_c центра величины над IV ватерлинией $z_c = \frac{N}{S} =$

Центр величины располагается под грузовой ватерлинией на расстоянии . . $h = \frac{T}{2} - z_c =$

Возвышение метацентра над центром величины дается формулой

$$\rho = \frac{\frac{2}{3}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} y^3\,dx}{D}$$

По формуле Чебышева интеграл имеет значение

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} y^3\,dx = \frac{(y_1^3 + y_2^3 + \ldots + y_9^3)\,L}{9}$$

а водоизмещение составляет

$$D = \frac{2LTS}{9 \cdot 7}$$

Таким образом

$$\rho = \frac{7\,(y_1^3 + y_2^3 + \ldots + y_9^3)}{3TS} \qquad (1)$$

Если бы было взято n вертикальных сечений и k горизонтальных, то формула (1) имела бы вид

$$\rho = \frac{k\,(y_1^3 + y_2^3 + \ldots + y_n^3)}{3TS} \qquad (2)$$

В этой формуле y — ординаты ватерлинии. Форма таблицы, отвечающей вычислениям по формуле (2), очевидна; что же касается числа значащих цифр, то в соответствии со вторым принципом мы сохраним из них только четыре в кубе наибольшей ординаты, что определит и точность остальных расчетов, как это можно видеть на численном примере.

Возвышение продольного метацентра определяется формулой

$$H = \frac{2\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} x^2 y\,dx}{D}$$

Отстояние центра тяжести ватерлинии от мидель-шпангоута мы предполагаем достаточно малым, чтобы можно было им пренебречь. В противном случае придется вычесть из числителя поправку $F \cdot \varepsilon^2$, где F — полная площадь ватерлинии, а ε — расстояние ее центра тяжести от мидель-шпангоута.

Так как вертикальные сечения распределены симметрично относительно мидель-шпангоута, то абсциссы связаны попарно соотношениями

$$x_1 = -x_9, \quad x_2 = -x_8, \quad x_3 = -x_7, \quad x_4 = -x_6, \quad x_5 = 0$$

и интеграл имеет значение

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} x^2 y dx = \frac{1}{9}[(y_1 + y_9) x_1^2 + (y_2 + y_8) x_2^2 + (y_3 + y_7) x_3^2 + (y_4 + y_6) x_4^2] L$$

Следовательно

$$H = \frac{7[(y_1 + y_9) x_1^2 + (y_2 + y_3) x_2^2 + (y_3 + y_7) x_3^2 + (y_4 + y_6) x_4^2]}{TS}$$

Изменения, которые необходимо внести в эту формулу в случае применения другого числа сечений, представляются очевидными, так же как и схема вычисления, для которой мы применим счетную линейку или логарифмы с четырьмя десятичными знаками.

Теперь перехожу к изложению метода для вычисления статической остойчивости.

Для этого был предложен целый ряд способов, которые могут быть значительно упрощены применением правила Чебышева вместо правил Симпсона или трапеций, без какого-либо изменения порядка вычислений. Если взять 7 или 9 поперечных сечений вместо 20, то соответственно сократятся и расчеты без ущерба для точности результатов.

В большинстве предложенных методов вычисляют остойчивость для различных водоизмещений корабля и путем интерполяции приводят результат к заданному водоизмещению.

Для военного корабля, где различия весов относительно незначительны, наибольший интерес представляет остойчивость при полной нагрузке; я изложу метод, применение которого представляется особенно выгодным в этом случае. Известно, что здесь идет речь о том, чтобы провести ряд равнообъемных ватерлиний и определить положения центра величины при заданном водоизмещении D.

Таким образом, вычисление остойчивости будет заключать в себе две раздельных операции: 1) построение равнообъемных ватерлиний; 2) вычисление координат центров тяжести входящего и выходящего клиновых отсеков, которые непосредственно дают плечо остойчивости (плечо восстанавливающего момента).

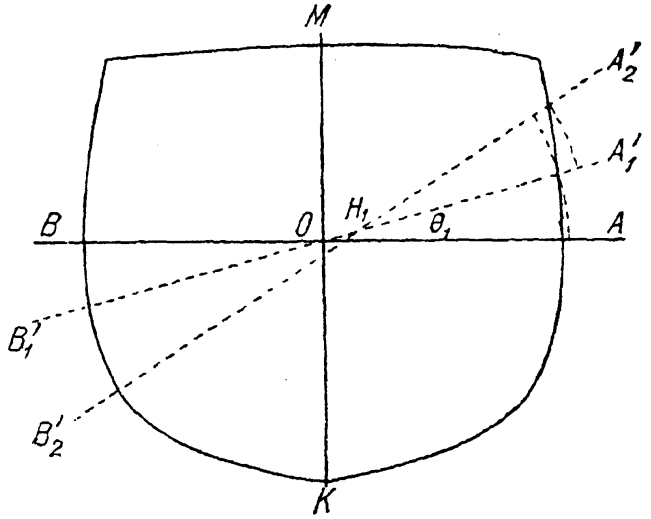
Начнем с рассмотрения первой из этих операций. Пусть MK (фиг. 1) — сечение корабля, на котором AB — грузовая ватерлиния для прямого положения. Проведем через ось O этой ватерлинии плоскость $B_1' A_1'$, наклоненную к AB под углом θ_1; если бы мы приняли эту плоскость за новую ватерлинию, то водоизмещение подводной части подверглось бы измене-

нию δD, равному разнице объемов v_1 и v_2 двух клиновых отсеков, для которых OAA_1' и OBB_1' являются их сечениями.

Величина этих объемов определится

$$v_1 = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} AOA_1'\,dx \quad \text{и} \quad v_2 = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} BOB_1'\,dx$$

Обозначая через a_0 и a_1 ординаты OA и OA_1' и через b_0 и b_1 — ординаты OB и OB_1' и рассматривая площади треугольников OAA_1' и OBB_1' как



Фиг. 1.

средние значения между площадями двух круговых секторов, описанных из центра O радиусами a_0 и a_1, b_0 и b_1, можно положить

$$\left.\begin{aligned} OAA_1' &= \frac{1}{4}(a_0^2 + a_1^2)\,\theta_1 \\ OBB_1' &= \frac{1}{4}(b_0^2 + b_1^2)\,\theta_1 \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Если угол θ_1 не превышает 10° и отношения $\frac{a_1}{a_0}$ и $\frac{b_1}{b_0}$ находятся в пределах между 0.9 и 1.1, то точность этих двух формул более чем достаточна, в чем можно убедиться путем простого вычисления. Беря n сечений, распределенных по Чебышеву, получим

$$v_1 = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} OAA_1'\,dx = \frac{\theta_1}{4}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} (a_0^2 + a_1^2)\,dx = \frac{\theta_1}{4}\,\frac{L}{n}\sum_{k=1}^{k=n}(a_{0k}^2 + a_{1k}^2)$$

$$v_2 = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} BOB_1'\,dx = \frac{\theta_1}{4}\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} (b_0^2 + b_1^2)\,dx = \frac{\theta_1}{4}\,\frac{L}{n}\sum_{k=1}^{k=n}(b_{0k}^2 + b_{1k}^2).$$

Отсюда изменение водоизмещения

$$\delta_1 D = v_1 - v_2 = \frac{\theta_1}{4}\frac{L}{n}\sum_{1}^{k=n}[(a_{0k}^2 + a_{1k}^2) - (b_{0k}^2 + b_{1k}^2)] = \\ = \frac{\theta_1}{4}\frac{L}{n}\sum_{k=1}^{k=n}(a_{0k}^2 - b_{0k}^2) + (a_{1k}^2 - b_{1k}^2) \tag{2}$$

Для грузовой ватерлинии имеем $a_{0k} = b_{0k}$ и

$$\delta_1 D = \frac{\theta_1}{4}\frac{L}{n}\sum_{k=1}^{k=n}(a_{1k}^2 - b_{1k}^2) \tag{2'}$$

Если бы это выражение было равно нулю, то плоскость $A_1' B_1'$ была бы требуемой ватерлинией, но обычно этого не бывает; если $\delta_1 D > 0$, то необходимо опустить плоскость $A_1' B_1'$ на такую величину p_1, чтобы объем цилиндра $A_1' B_1' p_1$ был равен $\delta_1 D$. Так как площадь сечения $A_1' B_1'$ равна

$$A_1' B_1' = \frac{L}{n}\sum_{k=1}^{k=n}(a_{1k} + b_{1k})$$

то

$$p_1 = \frac{\theta_1}{4}\frac{\sum_{k=1}^{k=n}(a_{1k}^2 - b_{1k}^2)}{\sum_{k=1}^{k=n}(a_{1k} + b_{1k})} \tag{3}$$

Обозначая через e_1 расстояние центра тяжести сечения $A_1' B_1'$ от оси O, имеем

$$e_1 = \frac{\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{k=n}(a_{1k}^2 - b_{1k}^2)}{\sum_{k=1}^{k=n}(a_{1k} + b_{1k})} \tag{4}$$

следовательно

$$p_1 = \frac{1}{2} e_1 \theta_1 \tag{5}$$

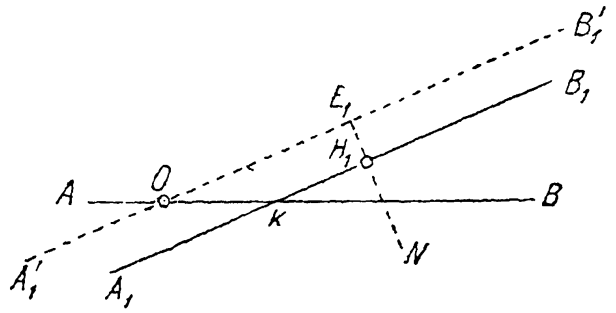
Путь (фиг. 2) $OE_1 = e_1$. Проведем перпендикуляр $E_1 N$ и отложим $E_1 H_1 = p_1$, тогда плоскость $B_1 H_1 A_1$ будет искомая равнообъемная ватерлиния. Учитывая малость линий p_1 и e_1 в том случае, когда угол $\theta_1 < 10°$, получим

$$KH_1 = OK = \frac{1}{2} e_1$$

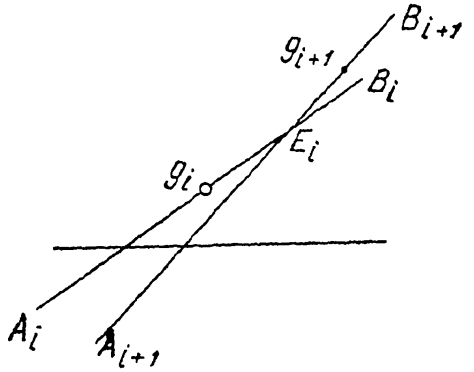
Обобщение этого свойства двух смежных разнообъемных ватерлиний послужит базой для их построения.

В дальнейшем под двумя *смежными ватерлиниями* будем понимать две ватерлинии, настолько близкие друг к другу, что можно с желаемой точностью рассматривать площадь поперечных сечений клиновых объемов как среднюю арифметическую площадей двух соответствующих круговых секторов и использовать для вычисления этих площадей формулы (1).

Пусть $A_i B_i$ (фиг. 3) — равнообъемная с AB ватерлиния, наклоненная под углом θ_i, g_i — ее центр тяжести; пусть $A_{i+1} B_{i+1}$ — также равнообъемная ватерлиния, наклоненная под углом θ_{i+1}, g_{i+1} — ее центр тяжести. Обозначая через a_i и b_i — ординаты ватерлинии $A_i B_i$, измеренные от продольной



Фиг. 2.



Фиг. 3.

оси, проходящей через g_i, а через a_{i+1} и b_{i+1} — ординаты ватерлинии $A_{i+1} B_{i+1}$, считая от g_{i+1} и полагая $e_i = g_i E_i$; $e_{i+1} = g_{i+1} E_i$, получим

$$\delta D = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{4} \cdot \frac{L}{n} \sum [(a_i - e_i)^2 - (b_i + e_i)^2 + (a_{i+1} + e_{i+1})^2 - (b_{i+1} - e_{i+1})^2]$$

Так как обе ватерлинии равнообъемны, то $\delta D = 0$; равным образом в силу свойств центра тяжести

$$\sum (a_i^2 - b_i^2) = 0 \quad \text{и} \quad \sum (a_{i+1}^2 - b_{i+1}^2) = 0$$

Таким образом, имеем

$$e_i \sum (a_i + b_i) = e_{i+1} \sum (a_{i+1} + b_{i+1}) \tag{6}$$

что выражается следующей теоремой:

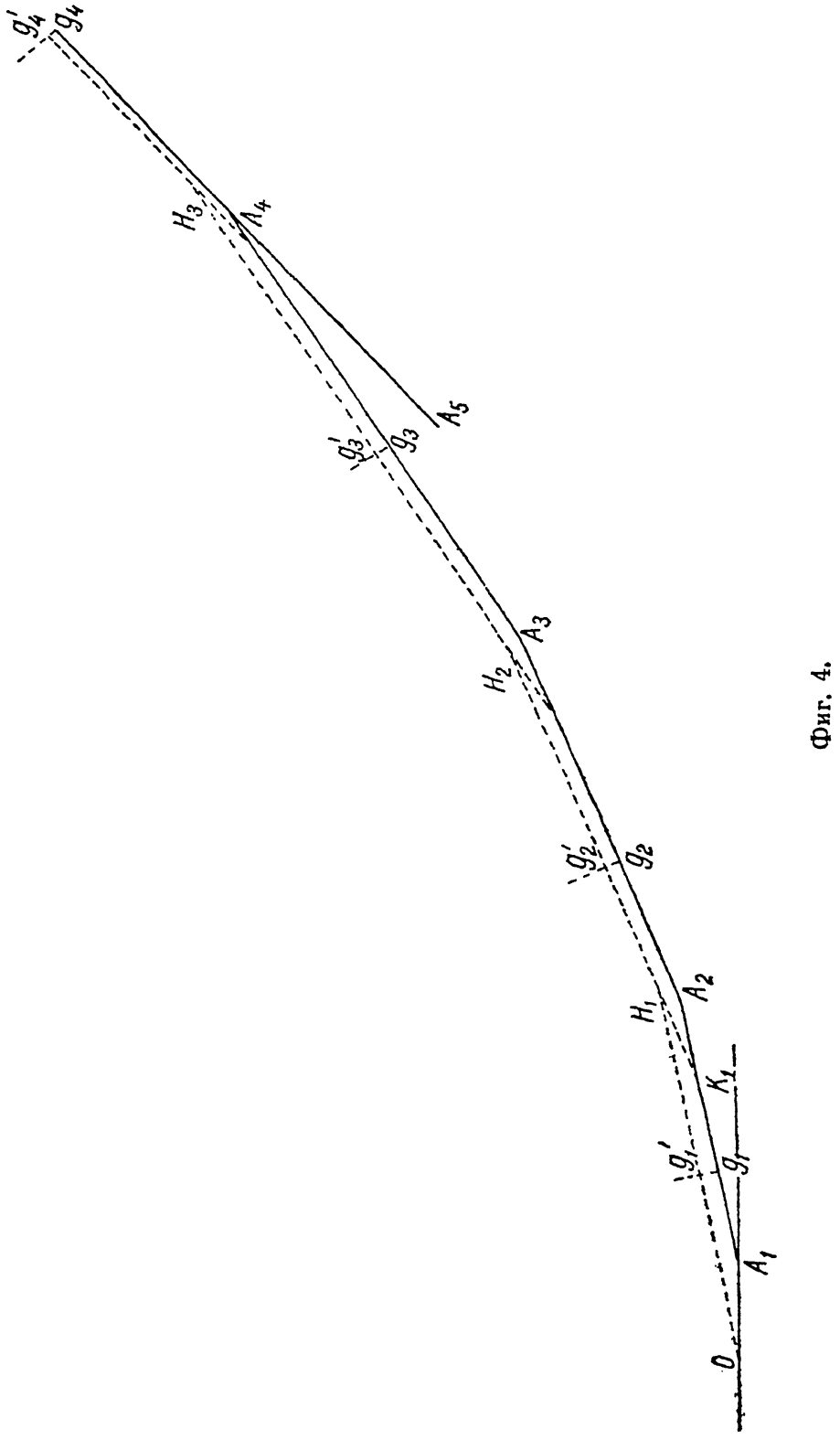
Статические моменты площадей двух смежных равнообъемных ватерлиний относительно прямой их пересечения равны друг другу.

Мы уже сказали, что следует понимать под смежными ватерлиниями.

Площади двух смежных ватерлиний равны между собой; следовательно

$$e_i = e_{i+1}$$

т. е. их центры тяжести лежат на равных расстояниях от оси пересечения. Мы видим, что вышеупомянутая теорема есть не что иное, как обобщение



Фиг. 4.

[1] В этой последней форме теорема выражает только следующее, очевидное само-по себе утверждение: отрезок кривой F, огибающей равнообъемные ватерлинии, заключенный между смежными ватерлиниями, может быть заменен дугой круга.

теоремы Эйлера о двух бесконечно близких друг к другу ватерлиниях: предел величин e_i и e_{i+1} равен 0.

Допустим, что мы построили ряд равнообъемных последовательных и попарно смежных ватерлиний; пусть $OA_1 A_2 A_3 A_4 A_5$ (фиг. 4) — многоугольник, образованный их пересечениями с плоскостью мидель-шпангоута, $g_1, g_2, \ldots g_4$ — проекции центров тяжести соответствующих ватерлиний. Речь идет о том, чтобы показать метод, который дает возможность построения этой серии ватерлиний. Проведя через ось O грузовой ватерлинии вспомогательную плоскость OH_1, измерим ординаты, которые обозначим через a_1 и b_1, и вычислим длину

$$e_1 = \frac{1}{2} \frac{\Sigma (a_1^2 - b_1^2)}{\Sigma (a_1 + b_1)}$$

Проведя $OA_1 = \frac{1}{2} e_1$, получим возможность провести первую ватерлинию $A_1 A_2$, наклоненную под углом θ_1 к грузовой ватерлинии. Практически она почти совпадает с OH_1.

Чтобы вычертить следующую ватерлинию, наклоненную под углом θ_2, отложим длину

$$OH_1 = \eta_1 = e_1 + \frac{1}{2} e_1 \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1} + \frac{\theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \right)$$

и через точку H_1 проведем вторую вспомогательную плоскость $H_1 H_2$, образующую с OA_1 угол θ_2. Эта плоскость была бы требуемой равнообъемной ватерлинией $A_2 A_3$, если бы соответствующая часть кривой F, огибающей равнообъемные ватерлинии, могла быть заменена отрезком касательной, или, точнее говоря, дугой окружности, которая в точках O и g_1 касается соответствующих ватерлиний. Действительно, если бы эта кривая была окружностью, то точка A_2 совпала бы с точкой K_1, так что имело бы место соотношение

$$g_1 K_1 : A_1 g_1 = \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\theta_2 - \theta_1) : \operatorname{tg} \frac{1}{2} \theta_1$$

так как углы θ_1 и $\theta_2 - \theta_1$ меньше 10°, то можно заменить их тангенсы самими углами и, учитывая, что $A_1 g_1 = \frac{1}{2} e$, получим

$$A_1 g_1 = \frac{1}{2} e_1 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1}$$

Так как расстояние между плоскостями $A_1 A_2$ и OH_1 равно $p_1 = \frac{1}{2} e_1 \theta_1$, то

$$K' H = \frac{p_1}{\sin (\theta_2 - \theta_1)} - \frac{1}{2} e_1 \frac{\theta}{\theta_2 - \theta_1}$$

следовательно,

$$OH_1 = e_1 + \frac{1}{2} e_1 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1} + \frac{1}{2} e_1 \frac{\theta}{\theta_2 - \theta_1}$$

Так как кривая F не является окружностью, то определенная таким образом плоскость $H_1 H_2$ не будет равнообъемной ватерлинией. Чтобы сделать соответствующее исправление, снимем ординаты a_1 и b_1 плоскости $H_1 H_2$, считая от точки H_1; тогда ошибка в водоизмещении составит

$$\delta_2 D = \delta_1 D + \frac{1}{4}(\theta_2 - \theta_1)\frac{L}{n} \sum [(a_2^2 - b_2^2) + (a_1 - \eta_1)^2 - (b_1 + \eta_1)^2] =$$

$$= \delta_1 D + \frac{1}{4}(\theta_2 - \theta_1)\frac{L}{n} \Big[\sum (a_2^2 - b_2^2) +$$

$$+ \sum (a_1^2 - b_1^2) - 2\eta_1 \sum (a_1 + b_1) + n\eta_1^2 \Big]$$

η_1 обыкновенно так мало, что членом $n\eta_1^2$ можно пренебречь; полагая

$$\left.\begin{aligned} \sum (a_i^2 - b_i^2) = Q_i \qquad & \sum (a_i + b_i) = q_i \\ e_i = \frac{1}{2}\frac{Q_i}{q_i} \qquad & p_i = \frac{\delta_i D}{q_i \frac{L}{n}} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

имеем

$$p_2 = p_1 \frac{q_1}{q_2} + \frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1)\left(e_2 + e_1 \frac{q_1}{q_2} - \eta_1 \frac{q_1}{q_2}\right) \tag{8}$$

Полагая

$$\begin{aligned} &A_1 g_1 = l_1, \quad A_2 g_2 = l_2, \quad A_3 g_3 = l_3, \quad \ldots . \\ &g_1 A_2 = l_1', \quad g_2 A_3 = l_2', \quad g_3 A_4 = l_3', \quad \ldots . \end{aligned}$$

и повторяя те же рассуждения, которые послужили для проведения вспомогательной плоскости $H_1 H_2$, увидим, что для того, чтобы провести вспомогательную плоскость $H_2 H_3$, наклоненную под углом θ_3, следует отложить длину

$$\eta_2 = H_1 H_2 = e_2 + g_2 k_2 + \frac{p_2}{\theta_3 - \theta_2}$$

но

$$g_2 k_2 : A_2 g_2 = (\theta_3 - \theta_2) : (\theta_2 - \theta_1)$$

следовательно

$$g_2 k_2 = A_2 g_2 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1} = l_2 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}$$

далее

$$A_2 g_2 = l_2 = \frac{p_1 - p_2}{\theta_2 - \theta_1} + e_2$$

таким образом

$$\eta_2 = e_2\left(1 + \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}\right) + \frac{p_2}{\theta_3 - \theta_2} + \frac{p_1 - p_2}{\theta_2 - \theta_1}\,\frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1} \tag{9}$$

Для того чтобы внести поправку, снимем ординаты этой плоскости, считая от точки H_2, и вычислим величину p_3 по формуле

$$p_3 = p_2\,\frac{q_2}{q_3} + \frac{1}{2}(\theta_3 - \theta_2)\left(e_3 + e_2\,\frac{q_2}{q_3} - \eta_2\,\frac{q_2}{q_3}\right) \tag{10}$$

Отметим затем точку H_3, через которую проведем плоскость H_3H_4, наклонение которой пусть будет θ_4, и продолжим построение аналогичным образом дальше, последовательно пользуясь для перехода от одной плоскости к следующей формулами типа

$$H_{i-1}H_i = \eta_i = e_i\left(1 + \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\theta_i - \theta_{i-1}}\right) + \frac{p_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} + \frac{p_{i-1} - p_i}{\theta_i - \theta_{i-1}}\,\frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\theta_i - \theta_{i-1}} \tag{11}$$

$$p_i = p_{i-1}\,\frac{q_{i-1}}{q_i} + \frac{1}{2}(\theta_i - \theta_{i-1})\left(e_i + e_{i-1}\,\frac{q_{i-1}}{q_i} - \eta_{i-1}\,\frac{q_{i-1}}{q_i}\right) \tag{12}$$

Поступая таким образом, мы построим непосредственно все равнообъемные ватерлинии, ибо значения величин p_i будут так малы, что вспомогательные плоскости OH_1, H_1H_2 практически совпадут с искомыми ватерлиниями.

Выпишем теперь все формулы, которые потребуются для вычисления равнообъемных ватерлиний.

Первая ватерлиния; угол наклонения θ_1

$$Q_1 = \sum(a_1^2 - b_1^2), \qquad q_1 = \sum(a_1 + b_1)$$

$$e_1 = \frac{1}{2}\,\frac{Q_1}{q_1}, \qquad p_1 = \frac{1}{2}\,e_1\,\theta_1$$

Вторая ватерлиния; угол наклонения θ_2

$$OH_1 = \eta_1 = e_1 + \frac{1}{2}\,e_1\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1} + \frac{\theta_1}{\theta_2 - \theta_1}\right)$$

$$Q_2 = \sum(a_2^2 - b_2^2), \qquad q_2 = \sum(a_2 + b_2)$$

$$e_2 = \frac{1}{2}\,\frac{Q_2}{q_2}, \qquad p_2 = p_1\,\frac{q_1}{q_2} + \frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1)\left(e_2 + e_1\,\frac{q_1}{q_2} - \eta_1\,\frac{q_1}{q_2}\right)$$

Третья ватерлиния; угол наклонения θ_3

$$H_1H_2 = \eta_2 = e_2\left(1 + \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}\right) + \frac{p_2}{\theta_3 - \theta_2} + \frac{p_1 - p_2}{\theta_2 - \theta_1}\,\frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}$$

$$Q_3=\sum(a_3^2-b_3^2), \qquad q_3=\sum(a_3+b_3)$$

$$e_3=\frac{1}{2}\frac{Q_3}{q_3}, \qquad p_3=p_2\frac{q_2}{q_3}+\frac{1}{2}(\theta_3-\theta_2)\left(e_3+e_2\frac{q_2}{q_3}-\eta_2\frac{q_2}{q_3}\right)$$

. . . . . , ...

i-я ватерлиния; угол наклонения θ_i

$$\left.\begin{aligned} H_{i-2}H_{i-1}=\eta_{i-1}=e_{i-1}\left(1+\frac{\theta_i-\theta_{i-1}}{\theta_{i-1}-\theta_{i-2}}\right)+\frac{p_{i-1}}{\theta_i-\theta_{i-1}}+\\ +\frac{p_{i-2}-p_{i-1}}{\theta_{i-1}-\theta_{i-2}}\cdot\frac{\theta_i-\theta_{i-1}}{\theta_{i-1}-\theta_{i-2}}\\ Q_i=\sum(a_i^2-b_i^2), \qquad q_i=\sum(a_i+b_i)\\ e_i=\frac{1}{2}\frac{Q_i}{q_i}, \qquad p_i=p_{i-1}\frac{q_{i-1}}{q_i}+\frac{1}{2}(\theta_i-\theta_{i-1})\times\\ \times\left(e_i+e_{i-1}\frac{q_{i-1}}{q_i}-\eta_{i-1}\frac{q_{i-1}}{q_i}\right) \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

В этих формулах a_i и b_i являются, соответственно, ординатами погружающейся и всплывающей частей вспомогательной плоскости $H_{i-1}H_i$, измеренными от точки H_{i-1}. При этом вычислении необходимо обратить внимание на знаки величин e_i, η_i и p_i и наносить на чертеж положительные значения e_i и η_i в направлении погружающихся или входящих ординат, а отрицательные значения — в противоположном направлении. Положительное значение p_i означает, что соответствующая ватерлиния должна быть проведена ниже ее вспомогательной плоскости, и наоборот.

Из вышеприведенных формул видно, что вся вычислительная работа сводится к расчету сумм

$$\sum(a_i^2-b_i^2) \quad \text{и} \quad \sum(a_i+b_i)$$

Так как ординаты a_i и b_i обыкновенно мало отличаются друг от друга, то лучше вычислять $(a_i^2-b_i^2)$ по формуле

$$a_i^2-b_i^2=(a_i+b_i)(a_i-b_i)$$

причем в произведении не требуется более 3 значащих цифр; равным образом для вычисления последовательных равнообъемных ватерлиний

рекомендуется применять нижеследующую таблицу, которую мы даем для случая 9 поперечных сечений.

i-я ватерлиния; угол наклонения θ_i
Вспомогательная плоскость $H_{i-1}\ H_i$

№№ сечений i	Ординаты входящие a_i	Ординаты выходящие b_i	$a_i + b_i$	$a_i - b_i$	$a_i^2 - b_i^2 = (a_i + b_i)(a_i - b_i)$	Кубы ординат[1] a_i^3	Кубы ординат[1] b_i^3
1	a_{i1}	b_{i1}	$a_{i1} + b_{i1}$	$a_{i1} - b_{i1}$	$(a_{i1} + b_{i1})\ (a_{i1} - b_{i1})$	a_{i1}^3	b_{i1}^3
2	a_{i2}	b_{i2}	$a_{i2} + b_{i2}$	$a_{i2} - b_{i2}$	$(a_{i2} + b_{i2})\ (a_{i2} - b_{i2})$	a_{i2}^3	b_{i2}^3
3	a_{i3}	b_{i3}	.	.	.	.	.
4	a_{i4}	b_{i4}	.	.	.	.	.
5	a_{i5}	b_{i5}	.	.	.	.	.
6	a_{i6}	b_{i6}	.	.	.	.	.
7	a_{i7}	b_{i7}	.	.	.	.	.
8	a_{i8}	b_{i8}	.	.	.	.	.
9	a_{i9}	b_{i9}	$a_{i9} + b_{i9}$	$a_{i9} - b_{i9}$	$(a_{i9} + b_{i9})\ (a_{i9} - b_{i9})$	a_{i9}^3	b_{i9}^3
Суммы . . .			$q_i =$		$+$ $-$ $Q_i =$		$I =$

$$e_i = \frac{1}{2}\frac{Q_i}{q_i} =$$

$$p_i = p_{i-1}\frac{q_{i-1}}{q_i} + \frac{1}{2}(\theta_i - \theta_{i-1})\left(e_i + e_{i-1}\frac{q_{i-1}}{q_i} - \eta_{i-1}\frac{q_{i-1}}{q_i}\right) =$$

$$\eta_i = e_i\left(1 + \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\theta_i - \theta_{i-1}}\right) + \frac{p_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} + \frac{p_{i-1} - p_i}{\theta_i - \theta_{i-1}} \cdot \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\theta_i - \theta_{i-1}} =$$

Для бо́льшей полноты и подробностей расчета приводится численный пример, из которого будет также видно, как учитывается прерывистость таких частей корпуса, как казематы, палубы надстроек и т. д.

Использование этих формул покажется, может быть, немного утомительным, вследствие того, что оно затрагивает наиболее общий случай, когда углы последовательных наклонений не возрастают в арифметической прогрессии и когда нельзя ни полагать $\frac{q_i}{q_{i+1}} = 1$, ни указывать какие-либо другие упрощения, которые всегда возможны, вследствие малости

[1] Эти два последних столбца необходимы для вычисления плеч остойчивости.

количеств p_i, e_i. Производя вычисление в каждом частном случае, мы отметим и постараемся использовать эти упрощения.

Казалось бы, что построение кривой C (геометрическое место центров величины) должно производиться непосредственно после определения кривой F, для которой построение описывающего ее многоугольника, а также точек касания (точки $g_1, g_2, \ldots$) было только что изложено; однако такой метод был бы неправильным, так как небольшая ошибка в величине l_i будет иметь значительное влияние на положение центра величины. Поэтому следует применить другой метод, лишенный этого недостатка.

Можно было бы, например, начертить действительные равнообъемные ватерлинии, снять их ординаты, считая от точек $g_1, g_2, \ldots$ и применить способ Барнса, пользуясь для квадратур формулой Чебышева; однако было бы более выгодным воспользоваться уже полученными ординатами вспомогательных плоскостей.

Метод, который надлежит применить в данном случае, так же хорошо известен, как и предыдущий; он состоит в вычислении координат центров тяжести объемов, отсеченных последовательными вспомогательными плоскостями, и во внесении затем необходимых поправок; но мы попытаемся развить его несколько отличным образом от того, который обычно применяется на практике, с тем, чтобы получить возможность определить два предела, между которыми заключается положение каждого из центров величины; последнее необходимо для того, чтобы лучше судить о точности результатов вычисления, так как все формулы являются приближенными. Формулы, которые мы выведем, дадут два очень узких предела. Взяв средние значения, получим уверенность в том, что ошибка не превысит половины разницы между найденными пределами.

Предположим, что мы знаем положение центра величины C_i, соответствующего наклонению θ_i, и пусть $H_{i-1}\ H_i$ — вспомогательная плоскость, ординаты которой a_i и b_i найдены.

Для того чтобы перейти к наклонению θ_{i+1}, требуется, согласно нашему способу, поступать следующим образом: 1) прибавить объем $\delta_i D$ между ватерлинией θ_i и ее вспомогательной плоскостью; 2) отнять вышедший объем клинового отсека v_1, заключенного между вспомогательной плоскостью $H_{i-1}\ H_i$ (наклоненной под углом θ_i) и плоскостью $H_i\ H_{i+1}$ (наклоненной под углом θ_{i+1}); 3) прибавить вошедший объем клинового отсека v_2, заключенного между теми же плоскостями, и 4) вычесть объем $\delta_{i+1} D$, заключенный между плоскостью $H_i\ H_{i+1}$ и равнообъемной ватерлинией θ_{i+1}.

Обозначая через y_{i+1} и z_{i+1} координаты центра величины C_{i+1}, соответствующего углу наклонения θ_{i+1}, через y_i и z_i — координаты центра величины C_i, через α_1 и β_1 — координаты центра тяжести клинового отсека v_1 и через α_2, β_2 — то же для клинового отсека v_2, через c_i и d_i — координаты точки H_i и через $(c_i + \gamma_i)$ и $(d_i + \varepsilon_i)$, и $(c_i + \gamma_{i+1})$ и $(d_i + \varepsilon_{i+1})$ —

координаты центров тяжести равнообъемных ватерлиний θ_i и θ_{i+1}, по теореме моментов получим

$$Dy_{i+1} = Dy_i + v_2\alpha_2 - v_1\alpha_1 + (c_i + \gamma_i)\delta_i D - (c_i + \gamma_{i+1})\delta_{i+1} D$$

Следовательно

$$(y_{i+1} - y_i) D = v_2\alpha_2 - v_1\alpha_1 + (c_i + \gamma_i)\delta_i D - (c_i + \gamma_{i+1})\delta_{i+1} D$$

Нам предстоит вычислить проекции перемещения центра величины, т. е. разности $y_{i+1} - y_i$ и $z_{i+1} - z_i$, которые не зависят от положения начала координат при условии, что оси будут параллельны. Предположим, что мы приняли начало координат в точке H_i, тогда получим

$$(y_{i+1} - y_i) D = v_2(\alpha_2 - c_i) - v_1(\alpha_1 - c_i) + \gamma_i\delta_i D - \gamma_{i+1}\delta_{i+1} D$$

Количества $\delta_i D$ и γ_i, γ_{i+1} — весьма малы, и их произведение — много ниже пределов точности вычисления,[1] поэтому можно им пренебречь; тогда получим формулу

$$y_{i+1} - y_i = \frac{v_2(\alpha_2 - c_i) - v_1(\alpha_1 - c_i)}{D}$$

и аналогично

$$z_{i+1} - z_i = \frac{v_2(\beta_2 - d_i) - v_1(\beta_1 - d_i)}{D}$$

Видно, что числитель этих формул представляет собой разницу моментов клиновых отсеков, взятых относительно осей, проходящих через точку H_i.

Итак, нам остается только произвести вычисление.

Совершенно ясно, что, беря вместо момента площади каждого из смешанных треугольников, которые образуют сечения клиновых отсеков, полусумму моментов двух соответствующих круговых секторов, мы получим значение бо́льшее, чем оно есть на самом деле, а беря моменты соответствующих треугольников, получим для полного момента клиновой части значение, меньшее действительного, так как почти для всех сечений и, в особенности, для сечений средней части, являющихся наиболее важными, криволинейная сторона упомянутого смешанного треугольника для общепринятых форм кораблей является выпуклой кривой.

Таким образом, *заменив для вычисления координат центров величины сечения клиновых частей средней величиной из двух соответствующих круговых секторов, мы получим верхний предел значения этих коорди-*

[1] Мы в этом немедленно убедимся, производя численные вычисления. Если в некоторых исключительных случаях указанное произведение достигло бы значительной величины, то это обстоятельство легко было бы учесть.

нат. Нижний предел их можно найти, взяв вместо упомянутого сечения соответствующий треугольник.

Остается, следовательно, только установить две группы формул, относящихся к этим предположениям.

Радиусы круговых секторов, которыми заменяются действительные сечения клиновых частей, при переходе от плоскости $H_{i+1}\,H_i$ к плоскости $H_i\,H_{i+1}$, будут следующими:

для погружающейся клиновой части $a_i - \eta_i$ и a_{i+1}
для всплывающей клиновой части $b_i + \eta_i$ и b_{i+1}

Следовательно, для моментов упомянутых секторов относительно осей, проходящих через точку H_i, получим

$$M_y' = \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} \int_0^{a_i-\eta_i} r^2 \cos\theta\, d\theta = \frac{1}{3}(a_i-\eta_i)^3(\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i)$$

$$M_y'' = -\int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} \int_0^{b_i+\eta_i} r^2 \cos\theta\, d\theta = -\frac{1}{3}(b_i+\eta_i)^3(\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i)$$

а полный момент составит

$$M_y = M_y' - M_y'' = \frac{1}{3}[(a_i-\eta_i)^3 + (b_i+\eta_i)^3](\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i)$$

Аналогично, момент относительно плоскости xy будет

$$M_z = \frac{1}{3}[(a_i-\eta_i)^3 + (b_i+\eta_i)^3](\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1})$$

Равным образом моменты площадей секторов, описанных радиусами a_{i+1} и b_{i+1}, составят

$$M_y = \frac{1}{3}(a_{i+1}^3 + b_{i+1}^3)(\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i)$$

$$M_z = \frac{1}{3}(a_{i+1}^3 + b_{i+1}^3)(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1})$$

Беря полусумму соответствующих моментов секторов и применяя формулу Чебышева для вычисления интегралов

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} M_y\, dx \quad \text{и} \quad \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} M_z\, dx$$

получим нижеследующие выражения для верхнего предела моментов клиновых частей

$$M_{i+1}=\frac{1}{2}\left(\dot{I}_i+\dot{I}_{i+1}\right)(\sin\theta_{i+1}-\sin\theta_i)+$$

$$+\frac{1}{2}\frac{L}{n}(q_i\eta_i^2-Q_i\eta_i)(\sin\theta_{i+1}-\sin\theta_i)$$

и

$$N_{i+1}=\frac{1}{2}\left(\dot{I}_i+\dot{I}_{i+1}\right)(\cos\theta_i-\cos\theta_{i+1})+$$

$$+\frac{1}{2}\frac{L}{n}(q_i\eta_i^2-Q_i\eta_i)(\cos\theta_i-\cos\theta_{i+1})$$

где через $\dot{I}_i$ и $\dot{I}_{i+1}$ обозначено

$$I_i=\frac{1}{3}\frac{L}{n}\sum(a_i^3+b_i^3)$$

$$I_{i+1}=\frac{1}{3}\frac{L}{n}\sum(a_{i+1}^3+b_{i+1}^3)$$

Что касается количеств q_i, Q_i, q_{i+1}, Q_{i+1}, η_i, то их выражения даны формулами (13). Для получения изменений координат центра величины, требуется разделить значения M_{i+1} и N_{i+1} на $D=\frac{2LTS}{nk}$

Тогда найдем

$$\left.\begin{aligned}y_{i+1}-y_i&=\frac{1}{2}(\rho_i+\rho_{i+1})(\sin\theta_{i+1}-\sin\theta_i)+\lambda_i(\sin\theta_{i+1}-\sin\theta_i)\\z_{i+1}-z_i&=\frac{1}{2}(\rho_i+\rho_{i+1})(\cos\theta_i-\cos\theta_{i+1})+\lambda_i(\cos\theta_i-\cos\theta_{i+1})\end{aligned}\right\}\quad(14)$$

где

$$\left.\begin{aligned}\rho_i&=\frac{\dot{I}_i}{D}=\frac{k}{3}\frac{\Sigma(a_i^3+b_i^3)}{2TS}\\\lambda_i&=\frac{k}{2}\frac{(q_i\eta_i^2-Q_i\eta_i)}{2TS}\end{aligned}\right\}\quad(15)$$

причем k есть число горизонтальных сечений, которые послужили для вычисления водоизмещения D, T — осадка, S — сумма всех ординат, которые были применены для определения водоизмещения.

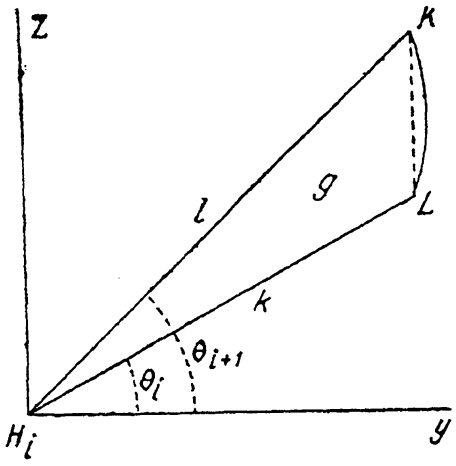
Переходим теперь к установлению формул, дающих нижний предел значений координат центров величины.

Пусть H_iKL (фиг. 5) — треугольник, которым мы заменяем сечение клиновой части, k, l — его стороны, g — его центр тяжести. Проведя через точку H_i две оси, H_iy и H_iz, параллельные осям координат, получаем

следующее выражение момента площади треугольника $H_i KL$ относительно оси $H_i z$:

$$M=\frac{1}{2}kl\sin(\theta_{i+1}-\theta_i)\frac{l\cos\theta_{i+1}+k\cos\theta_i}{3}=$$

$$=\frac{1}{6}(kl^2\cos\theta_{i+1}+k^2 l\cos\theta_i)\sin(\theta_{i+1}-\theta_i)$$



Фиг. 5.

Чтобы избежать умножений, которые потребовались бы при вычислении выражений kl^2 и $k^2 l$ и чтобы использовать таблицы кубов чисел, напомним, что

$$(l+k)^3+(l-k)^3=2l^3+6k^2 l$$

так как обе ватерлинии являются смежными, и отношение $\frac{k}{l}$ заключается между 0.9 и 1.1, то величиной $(l-k)^3$ можно пренебречь по сравнению с $(l+k)^3$ и положить приближенно[1]

$$k^2 l=\frac{(l+k)^3}{6}-\frac{l^3}{3}$$

точно так же

$$kl^2=\frac{(l+k)^3}{6}-\frac{k^3}{3}$$

Пользуясь этими двумя формулами, получаем следующее значение момента площади треугольника

$$M=\frac{1}{36}[(k+l)^3(\cos\theta_{i+1}+\cos\theta_i)-2k^3\cos\theta_{i+1}-$$

$$-2l^3\cos\theta_i]\sin(\theta_{i+1}-\theta_i)$$

Замечая, что сторона $k=a_i-\eta_i$ и $l=a_{i+1}$ для погружающейся клиновой части и $k=b_i+\eta_i$ и $l=b_{i+1}$ — для всплывающей клиновой части, видим, что суммарный моменг обоих треугольников для обеих клиновых частей равен

$$M=\frac{1}{36}\{[(a_i+a_{i+1}-\eta_i)^3+(b_i+b_{i+1}+\eta_i)^3](\cos\theta_{i+1}+\cos\theta_i)-$$

$$-2[(a_i-\eta_i)^3+(b_i+\eta_i)^3]\cos\theta_{i+1}-2(a_i^3+b_{i+1}^3)\cos\theta_i\}\sin(\theta_{i+1}-\theta_i)$$

---

[1] Например пусть будет $k=10$, $l=11$; тогда имеем $k^2 l=1100$ и $\frac{(l+k)^3}{6}-\frac{l^2}{3}=1099.8$; $kl^2=1210$ и $\frac{(k+l)^3}{6}-\frac{k^3}{3}=1210.2$, причем ошибка появляется только в 5-м знаке; даже, если бы отношение $\frac{k}{l}$ заключалось между 1.2 и 0.8, то ошибка проявилась бы только в 4-м знаке.

Сделав преобразование и отметив, что для двух смежных ватерлиний можно полагать приближенно

$$(b_i + b_{i+1})^2 - (a_i + a_{i+1})^2 = 2(b_i^2 - a_i^2) + 2(b_{i+1}^2 - a_{i+1}^2)$$

и, применив для вычисления интегралов формулу Чебышева, получим следующие выражения, которые дают нижний предел изменения координат центра величины

$$\begin{aligned} y_{i+1} - y_i = \frac{1}{12}[(R_i - 2\rho_i)\cos\theta_{i+1} + (R_i - 2\rho_{i+1})\cos\theta_i]\sin(\theta_{i+1} - \theta_i) + \\ + \frac{1}{12}(l_i\cos\theta_{i+1} + m_i\cos\theta_i)\sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \end{aligned} \tag{16}$$

и аналогично

$$\begin{aligned} z_{i+1} - z_i = \frac{1}{12}[(R_i - 2\rho_i)\sin\theta_{i+1} + (R_i - 2\rho_{i+1})\sin\theta_i]\sin(\theta_{i+1} - \theta_i) + \\ + \frac{1}{12}(l_i\sin\theta_{i+1} + m_i\cos\theta_i)\sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \end{aligned} \tag{17}$$

где

$$\left.\begin{aligned} R_i &= \frac{k}{3}\,\frac{\Sigma[(a_i + b_i)^3 + (b_i + b_{i+1})^3]}{2TS} \\ l_i &= k\,\frac{(q_i - q_{i+1})\eta_i^2 - 2Q_i\eta_i}{2TS} \\ m_i &= k\,\frac{(q_i + q_{i+1})\eta_i^2 - 2(Q_i + Q_{i+1})\eta}{2TS} \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

Мы видим, что для получения нижнего предела достаточно для каждого угла наклонения вычислить только на одну сумму больше (R_i); вычисление малых количеств l_i, m_i не представляет никакого затруднения и в большинстве случаев эти количества будут так малы сравнительно с ρ_i и R_i, что ими можно будет пренебречь и вместо формул (14) и (16) применить следующие:

для верхнего предела

$$\left.\begin{aligned} y_{i+1} - y_i &= \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_{i+1})(\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i) \\ z_{i+1} - z_i &= \frac{1}{2}(\rho_i + \rho_{i+1})(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1}) \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

и для нижнего предела

$$\begin{aligned} y_{i+1} - y_i = \frac{1}{12}[(R_i - 2\rho_i)\cos\theta_{i+1} + (R_i - 2\rho_{i+1})\cos\theta_i]\sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \\ z_{i+1} - z_i = \frac{1}{12}[(R_i - 2\rho_i)\sin\theta_{i+1} + (R_i - 2\rho_{i+1})\sin\theta_i]\sin(\theta_{i+1} - \theta_i) \end{aligned} \tag{20}$$

По предыдущим формулам были вычислены последовательные разности координат центров величины, самые же координаты мы подсчитываем, принимая за начало координат центр величины C_0, соответствующий прямому положению корабля.

Тогда получим

$$\begin{aligned} y_0 &= 0 & z_0 &= 0 \\ y_1 - y_0 &= \ldots, & z_1 - z_0 &= \ldots \\ y_2 - y_1 &= \ldots, & z_2 - z_1 &= \ldots \\ y_3 - y_2 &= \ldots, & z_3 - z_2 &= \ldots \\ &\ldots\ldots & &\ldots\ldots \end{aligned}$$

Беря последовательные суммы, получаем координаты y_1, z_1, y_2, $z_2, \ldots$ центров величины C_1, $C_2, \ldots$, отвечающих наклонениям на углы θ_1, $\theta_2, \ldots$

Подсчитав эти координаты, получаем величину соответствующих плеч остойчивости формы по формуле

$$r_i = y_i \cos\theta_i + z_i \sin\theta_i \qquad (21)$$

Что касается деталей этих расчетов, то мы отсылаем читателя к численному примеру.

Эти выкладки могут показаться сложными, вследствие того, что мы считались с величинами высших порядков, которыми обыкновенно пренебрегают, но следует различать вывод формулы от ее применения при численном вычислении.

Повторяем еще раз, что формула квадратур Чебышева одинаково предпочтительна для вычисления остойчивости любым методом, причем она везде вносит одинаковое упрощение. Вместо 20 ординат можно взять 7 или 9, во всяком случае не больше, и это соответственно сократит работу и вполне окупит время и труд, затраченные на вычерчивание 7 или 9 вспомогательных поперечных сечений.

Детальный расчет изгибающих моментов корабля, как обычно указывают, впервые был выполнен Э. Ридом для корабля „Bellérophon“, однако Эйлер еще в 1758 г. получил премию Парижской Академии наук за свой мемуар „Анализ усилий, которым подвергаются все части корабля при бортовой и килевой качке“.[1] Таким образом, протекло целое столетие, прежде чем получили практическое осуществление идеи, развитые впервые Эйлером в этом мемуаре.

Рид, производя свои расчеты, принимает следующие гипотезы, точность которых не поддается определению: 1) что корабль находится в равновесии на вершине или на подошве волны, длина которой равна длине корабля;

[1] Recueil des pièces qui ont remporté le prix de l'Académie des Sciences, t. 7 (1759).

2) что в этом положении полное водоизмещение корабля то же, что и в нормальном положении; 3) что сила поддержания для каждой из частей корабля равна водоизмещению этой части и направлена вертикально.

Мы видим, следовательно, что расчет, основанный на таких гипотезах, является чем-то вроде первого приближения к строгому решению проблемы. Для второго приближения следовало бы применить законы килевой качки на волнении и учесть силы инерции. Что касается строгого решения, то оно слишком сложно для того, чтобы можно было рискнуть выполнить его хотя бы приблизительно.

Мы ограничимся таким же приближением, как и у Рида, — приближением, которое допускается практикой. Итак, прежде всего дело заключается в том, чтобы „поставить корабль на подошву или на вершину волны".

Иногда предлагают для этой операции использование масштаба Бонжана, но мы покажем, что не нужно даже знать водоизмещения корабля, чтобы поставить его на волну; это — операция, требующая, самое бо́льшее, $\frac{1}{4}$ часа времени; следует только применить метод *последовательных приближений*, которым, как кажется, очень пренебрегают в теории корабля, предпочитая метод графической интерполяции.

Эти два метода не исключают взаимно друг друга, но можно легко уточнить вопросы, относящиеся к каждому из них. Если необходимо определить единственное значение одного только параметра или единой системы одновременных значений нескольких неизвестных параметров, иначе говоря, если требуется решить систему уравнений, то должен быть применен метод последовательных приближений. Если, наоборот, требуется изучить ход явления или определить целую серию значений одной функции, то следует прибегнуть к графической интерполяции.

Чтобы поставить корабль на вершину волны, поступим следующим образом: вычертив профиль волны, проведем горизонтальную линию посредине ее высоты и построим на полосе прозрачной бумаги (на кальке) ординаты профиля волны, соответствующие k сечениям корабля, распределенным по правилу Чебышева. Теперь требуется поместить среднюю линию волны таким образом, чтобы сумма погруженных площадей шпангоутов не изменилась.

Определим расстояние этой линии от грузовой ватерлинии методом последовательных приближений. Предположив, в качестве первого приближения, что это расстояние равно нулю, перенесем с помощью указанной полоски бумаги ординаты профиля волны на плоскость мидель-шпангоута и непосредственно увидим вошедшие и вышедшие трапеции. Для вычисления их площадей берем обе крайние ординаты каждой из этих трапеций и их высоту и получаем таким образом следующую таблицу:

Первое положение. — Расстояние средней линии от ватерлинии $z = 0$.

I	II	III	IV	V	VI
№№ сечений	Высота трапеции (+погруженная —оголившаяся) h	Неизменное основание трапеций (сумма обеих ординат ватерлинии) a	Переменное основание трапеций (сумма ординат в точках пересечения с волной) α	Полусумма оснований $\frac{\text{III} + \text{IV}}{2}$	Площади трапеций $\text{V} \times \text{II}$
1 и 9	$-h_1$	$a_1 + a_9$	$\alpha_1 + \alpha_9$	$\frac{a_1 + a_9 + \alpha_1 + \alpha_9}{2}$	$-h_1 \frac{a_1 + \ldots + \alpha_9}{2}$
2 и 8	$-h_2$	$a_2 + a_8$	$\alpha_2 + \alpha_8$	·	·
3 и 7	$-h_3$	$a_3 + a_7$	$\alpha_3 + \alpha_7$	·	·
4 и 6	$+h_4$	$a_4 + a_6$	$\alpha_4 + \alpha_6$	·	·
5	$+h_5$	a_5	α_5	$\frac{a_5 + \alpha_5}{2}$	$+\frac{h_5}{2}(a_5 + \alpha_5)$
			Суммы . .	$S_1 =$	$+$ $-$
					$E_1 =$

Второе приближение: $z_1 = \frac{E_1}{S_1}$.

Взяв суммы двух последних столбцов, мы видим, что, для того чтобы сделать ошибку на площадях шпангоутов E равной нулю, следует поднять или опустить, смотря по знаку величины E, среднюю линию волны на величину $z_1 = \frac{E_1}{S_1}$.

Итак, положим $z = z_1$; чтобы проделать снова вычисление, достаточно поставить новые ординаты α, и мы получим третье приближение $z_2 = z_1 + \delta z_1$, которое, обыкновенно, уже не нуждается в поправке.

Если подойти более внимательно, то можно поместить среднюю линию волны сразу же не на ватерлинии ($z = 0$), но немного ниже, таким образом, чтобы на-глаз было видно, что погруженные площади равны сумме всплывших площадей, тогда второе приближение даст достаточную точность, а это значит, что третье приближение определит $\delta z_1 = 0$.

Очевидна простота этого метода и способа его применения, особенно в том случае, если пользоваться формулой квадратур такого же типа, как формула Чебышева.

Зная, таким образом, положение корабля на волне, строим кривую сил поддержания, пользуясь суммами ординат каждого шпангоута, уже полученными нами при вычислении водоизмещения. Так как эти суммы пропорциональны площадям шпангоутов на тихой воде, т. е. ординатам кривой сил поддержания при нормальном положении корабля, то остается прибавить к ним поправки от погруженных или оголившихся трапеций, определяемых профилем волны на каждом шпангоуте.

Следующим шагом в этом вычислении будет построение кривой весов на погонный метр длины корабля.

Рекомендуется разделить корабль на отрезки длиною от 3 до 5 м и вычислить все веса, находящиеся в пределах каждого отрезка, причем отношение этого веса отрезка к его длине даст соответствующую ординату искомой кривой. Таким образом, получится прерывистая ломаная линия, составленная из различных элементов, параллельных оси. Плавность этой линии регулируется затем наглаз.

Этот прием внушает опасение о том, что вычисление изгибающих моментов будет весьма трудоемким. На самом же деле это не так; нужно только производить вычисление наиболее рациональным образом.

С этой целью прежде всего отметим, что все веса, которые составляют нагрузку корабля, распределены весьма неравномерно, в особенности с точки зрения распределения их на погонный метр длины; так, веса килей, кильсонов, переборок и других продольных связей распределены почти равномерно по всей длине, тогда как бронированный траверз, вес которого достигает более 100 т, концентрируется на длине, равной толщине брони, т. е., приблизительно, на 30 сантиметрах. Таким образом, не следует даже пытаться представить распределение всех весов в виде непрерывной кривой; необходимо прежде классифицировать их соответствующим образом.

1. *Непрерывные веса.* Это суть те веса, которые распределены равномерно или непрерывно по всей или почти по всей длине корабля; таковы, например, веса продольных связей, обшивки с набором, веса палуб, бортовой брони, палубной брони и т. д.

2. *Местные или прерывистые веса.* Это суть те веса, которые распределены равномерно или непрерывно на ограниченной длине и не имеют никакой взаимной связи или зависимости; таковы веса паровых котлов, каменного угля, машинной установки, продовольственных запасов, боеприпасов, бронированных казематов и т. д.

3. *Сосредоточенные веса.* Это суть веса значительной величины, которые занимают весьма ограниченное протяжение по длине корабля, так что соответствующая им ордината кривой нагрузок намного превышает все прочие; таковы веса бронированных траверзов, ахтер-штевня, крупных артиллерийских орудий и т. д.

Необходимость такой классификации сделается очевидной после объяснения способа построения кривой весов и действующих нагрузок.

В самом деле, достаточно воспроизвести в виде непрерывной кривой лишь веса первого класса, для этого, очевидно, требуется только вычислить незначительное количество ординат этой кривой. Сделаем, следовательно, 5 или 6 сечений корабля и, руководствуясь спесификацией корабля, вычислим веса всех продольных связей на погонный метр

и затем нанесем их как ординаты первой частной кривой, которая будет непрерывной и притом почти прямой, параллельной оси абсцисс. Таким же образом поступим и с обшивкой, прибавляя к ней набор; полученные значения нанесем как ординаты соответствующей частной кривой, откладывая их от кривой, которая представляет собой распределение весов продольных связей. Затем перейдем к палубам и т. д., и к частным кривым, соответствующим весам, занимающим только часть общей длины, стараясь при этом наносить ординаты каждой кривой, наращивая предшествующую. Наружный контур полученной таким образом линии представит собой почти непрерывную кривую, которую легко можно вычертить.

Для весов второго класса, вследствие самого характера их распределения, мы не сможем получить непрерывную кривую. Линия, которую мы построим по частям, будет состоять из нескольких непрерывных кривых, расположенных „ступеньками". Вычисление каждой частной кривой может быть произведено незамедлительно, если известны все веса, как, например, веса котлов, машины, угля и т. д., и протяжение, которое они занимают по длине корабля.

Веса третьего класса не могут быть изображены на чертеже: мы будем их считать внешними силами, приложенными в соответствующих точках.

Чтобы получить кривую действующих нагрузок, начнем с вычитания из ординат кривой сил поддержания ординат кривой непрерывных весов. Если полученную таким образом кривую сопоставить с ломаной ступенчатой линией, которая представляет распределение прочих весов, то, беря разность соответствующих ординат, мы построим новую линию, которая также будет составлена из нескольких отдельных кривых, расположенных ступеньками; это и будет кривая действующих нагрузок.

Когда эта кривая будет построена, то ее интегрирование даст кривую срезывающих усилий. При построении этой последней необходимо в соответствующих точках добавить внешние силы (веса траверзов и т. д.), не представленные на кривой нагрузок. Добавление каждого из этих весов определяет резкий скачок на кривой срезывающих усилий, причем разность двух ординат, соответствующих одной и той же абсциссе, равна добавляемой внешней силе.

Если мы правильно рассчитали все веса, то кривая срезывающих усилий должна сама собой замкнуться, т. е. ее две крайних ординаты должны быть равны нулю.

Интегрирование кривой срезывающих усилий дает кривую изгибающих моментов, которая, будучи непрерывной, имеет точки „перелома" в абсциссах, где ее производная меняется скачкообразно.

Эта кривая должна была бы также замкнуться сама собой, но обычно этого не бывает, потому что, помещая корабль на волне, мы сохраняем только водоизмещение, не уделяя должного внимания положению

центра величины, который не будет находиться на одной вертикали с центром тяжести. Таким образом, весь корабль будет подвергаться действию пары сил, мерой которой служит крайняя ордината кривой моментов.

Ввести поправку очень просто: достаточно провести прямую, соединяющую точку A на оси, где начинается кривая, с точкой C ее последней ординаты; чтобы получить изгибающие моменты, надо измерить ординаты, начиная не от оси AB, а от оси AC. В самом деле, можно было бы компенсировать упомянутую внешнюю пару сил либо наклоном корабля, что изменило бы кривую сил поддержания, либо переносом надлежащего груза с одной оконечности корабля на другую. Прямая AC представляет собой изменение моментов, происходящее от такого переноса груза. Этот груз обычно небольшой (около 20 т для корабля в 10 тыс. т), и, так как цель вычисления заключается в том, чтобы проверить надежность связей, то перемещение такого груза не окажет значительного влияния на прочность корабля.

Если бы мы пожелали изменить кривую сил поддержания, то взяли бы горизонтальную проекцию сечения корабля поверхностью волны, пусть $y_0, y_1, \ldots, y_k$ — ее ординаты, соответствующие абсциссам $x_0, x_1, \ldots, x_k$. Построим кривую, ординаты которой будут $x_0 y_0, x_1 y_1, x_2 y_2, \ldots, x_k y_k$; двойное интегрирование последней кривой даст нам числа, пропорциональные моментам от изменения сил поддержания, соответствующего бесконечно-малому изменению положения корабля на волне. Полученные таким образом ординаты уменьшим в отношении $\frac{BC}{y}$, где BC есть крайняя ордината кривой изгибающих моментов, а y — ордината кривой, которую мы только что построили, и заменим уменьшенной таким образом кривой прямую AC.

Таким же образом мы поступили бы и в случае положения корабля на подошве волны.

Располагая вычисления только что изложенным порядком, мы убедимся в том, что они ни в какой мере не страдают громоздкостью общепринятых методов.

Приложение 1-е

Так как в классических курсах интегрального исчисления отсутствует вывод формул квадратур Чебышева, то мы полагаем, что было бы не бесполезным дать здесь элементарное доказательство этой формулы, которую мы в основном заимствуем из „Курса интегрального исчисления“ Н. Алексеева.

Пусть будет

$$S=\int_a^b f(z)\,dz$$

какой-нибудь определенный интеграл; полагая

$$z=\frac{a+b}{2}+\frac{a-b}{2}x$$

можно всегда свести этот интеграл к другому, пределы которого пусть будут —1 и +1; будем рассматривать только интегралы вида

$$S=\int_{-1}^{+1} f(x)\,dx$$

Все формулы, которые применяются для приближенного вычисления этих интегралов, сводятся к следующей

$$S=\int_{-1}^{+1} f(x)\,dx=\sum_{i=1}^{i=k} A_i f(x_i)$$

Следовательно, вопрос заключается в том, чтобы отыскать надлежащие значения коэффициентов A_i и абсцисс x_i. Таким образом, мы имеем $2k$ произвольных величин; мы можем распоряжаться ими различными способами.

Если бы мы пожелали при данном числе k ординат получить максимально возможную точность, то должны были бы рассматривать как неизвестные абсциссы $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_k$ и коэффициенты $A_1, A_2, A_3, \ldots, A_k$ и пришли бы к формуле Гаусса.

Если бы мы предположили все ординаты $f(x)$ равноотстоящими друг от друга, то x_i были бы известны; и тогда нам оставалось бы только определить величины A_m, и мы получили бы правило Котеса.

Но мы можем, наоборот, задаться коэффициентами и определить соответствующие абсциссы. Так именно и был поставлен вопрос Чебышевым, который принимает все коэффициенты равными между собой

$$A_1=A_2=A_3=\ldots=A_k=A$$

Остается только определить значение A и абсциссы $x_1, x_2, \ldots, x_k$ для данного значения k.

Предположим, что функция $f(x)$ разложена в ряд по формуле Маклорена

$$f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\ldots+a_kx^k+R_k$$

Интеграл $S=\int_{-1}^{+1} f(x)\,dx$ будет иметь значение

$$S=2\left(a_0+\frac{a_2}{3}+\frac{a_4}{5}+\frac{a_6}{7}+\ldots\right)+\int_{-1}^{+1} R_k\,dx$$

Пренебрегая интегралом $\int_{-1}^{+1} R_k\,dx$, получим приближенную формулу

$$\begin{aligned}
S &= A[f(x_1)+f(x_2)+\ldots+f(x_k)]= \\
&= A(a_0+a_1x_1+a_2x_1^2+a_3x_1^3+\ldots+a_kx_1^k)+ \\
&+ A(a_0+a_1x_2+a_2x_2^2+a_3x_2^3+\ldots+a_kx_2^k)+ \\
&+ A(a_0+a_1x_3+a_2x_3^2+a_3x_3^3+\ldots+a_kx_3^k)+ \\
&+ \ldots\ldots\ldots\

щихся корнями уравнения $F(x)=0$, получаем следующие формулы Ньютона для определения коэффициентов

$$\begin{aligned}
&s_1+p_1=0\\
&s_2+p_1s_1+2p_2=0\\
&s_3+p_1s_2+p_2s_1+3p_3=0\\
&s_4+p_1s_3+p_2s_2+p_3s_1+4p_4=0\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots
\end{aligned}$$

Подставляя вместо $s_1, s_2, s_3, \ldots$ их значения

$$s_1=s_3=s_5=\ldots=s_{2i+1}=0$$

$$s_2=\frac{k}{3},\quad s_4=\frac{k}{5},\quad s_6=\frac{k}{7},\quad \ldots,\quad s_{2i}=\frac{k}{2i+1}$$

получаем следующие уравнения для определения $p_1, p_2, \ldots p_k$:

$$p_1=0$$

$$\frac{k}{3}+2p_2=0$$

$$p_3=0$$

$$\frac{k}{5}+\frac{k}{3}p_2+4p_4=0$$

$$p_5=0$$

$$\frac{k}{7}+\frac{k}{5}p_2+\frac{k}{3}p_4+6p_6=0$$

$$p_7=0$$

$$\cdots$$

Закон образования этих уравнений очевиден.

Придавая величине k последовательно значения

$$2,\quad 3,\quad 4,\quad 5,\quad 6,\quad 7,\quad 9$$

и определяя значения соответствующих p, мы будем иметь следующие уравнения для вычисления абсцисс

$$k=2\qquad x^2-\frac{1}{3}=0$$

$$k=3\qquad x^3-\frac{x}{2}=0$$

$$k=4\qquad x^4-\frac{2}{3}x^2+\frac{1}{45}=0$$

$$k=5\qquad x^5-\frac{5}{6}x^3+\frac{7}{72}x=0$$

$$k=6\qquad x^6-x^4+\frac{1}{5}x^2-\frac{1}{105}=0$$

$$k=7 \qquad x^7-\frac{7}{6}x^5+\frac{119}{360}x^3-\frac{149}{6480}x=0$$

$$k=9 \qquad x^9-\frac{3}{2}x^7+\frac{27}{40}x^5-\frac{57}{560}x^3+\frac{53}{22\,400}x=0$$

Мы не написали только уравнения для $k=8$, потому что оно имеет мнимые корни, которые нам не подходят.

Решая эти уравнения, получим следующую таблицу[1]

Значения абсцисс для формулы Чебышева

Число ординат	Абсциссы (пределы интеграла равны +1 и —1)
$k=2$	$x_1=-x_2=0.577350$
$k=3$	$x_1=-x_3=0.707107$ $x_2=0$
$k=4$	$x_1=-x_4=0.794654$ $x_2=-x_3=0.187592$
$k=5$	$x_1=-x_5=0.832498$ $x_2=-x_4=0.374541$ $x_3=0$
$k=6$	$x_1=-x_6=0.866247$ $x_2=-x_5=0.422519$ $x_3=-x_4=0.266635$
$k=7$	$x_1=-x_7=0.883862$ $x_2=-x_6=0.529657$ $x_3=-x_5=0.323912$ $x_4=0$
$k=9$	$x_1=-x_9=0.911589$ $x_2=-x_8=0.601019$ $x_3=-x_7=0.528762$ $x_4=-x_6=0.167906$ $x_5=0$

Таким образом, формула Чебышева имеет вид

$$\int_{-1}^{+1} f(x)\,dx=\frac{2}{k}\sum_{i=1}^{i=k} f(x_i)$$

[1] Как показал акад. С. Н. Бернштейн, при $k>9$ среди корней уравнения, определяющего $x_1, x_2, \ldots, x_k$, есть мнимые, и формула Чебышева не применима. (*Ред.*).

Если бы пределы интеграла были $+\frac{L}{2}$ и $-\frac{L}{2}$, то мы имели бы

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} f(x)\,dx = \frac{L}{2}\int_{-1}^{+1} f\left(\frac{Lz}{2}\right)dz$$

Применив к последнему интегралу формулу Чебышева, получим

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} f(x)\,dx = \frac{L}{k}\sum_{i=1}^{i=k} f(x_k)$$

Таким образом, находим следующее правило: для того чтобы найти площадь кривой, измеряют ординаты, соответствующие абсциссам Чебышева, и умножают среднее арифметическое этих ординат на длину основания.

Оригинальное изложение метода, сделанное его знаменитым автором, можно найти в мемуаре „О квадратурах“ (Journal de Liouville, 1874).

Чтобы показать точность формулы Чебышева в ее приложениях к вычислению элементов корабля, я возьму несколько примеров. Мидель-левое сечение корабля выражается уравнением

$$y = a\,\frac{1-\left(\frac{z+h}{1+h}\right)^3}{1+n\left(\frac{z+h}{1+h}\right)^3}$$

осадка корабля принята равной 1, ось z направлена вертикально вниз, начало координат находится в пересечении ватерлинии с диаметральной плоскостью. Параметры имеют следующие значения

$$h = -0.0584, \quad n = -0.5346$$

значение величины a (половины ширины сечения) безразлично ($a = 1.4603$).

По этим данным без труда вычисляем отношение площади мидель-шпангоута к площади описанного прямоугольника по нижеследующей точной формуле

$$\frac{S}{a}=\frac{1}{a}\int_0^1 \frac{1-\left(\frac{z+h}{1+h}\right)^3}{1+n\left(\frac{z+h}{1+h}\right)^3}\,dz=$$

$$=\left(1+\frac{1}{n}\right)\frac{k\,(h+1)}{3}\left[\frac{1}{2}\log\frac{1+k^2}{1-k+k^2}-\frac{1}{2}\log\frac{\left(\frac{h}{h+1}+k\right)^2}{\left(\frac{h}{h+1}\right)^2-\frac{kh}{h+1}+k^2}+\right.$$

$$\left.+\sqrt{3}\,\text{arc tang}\,\frac{\sqrt{3}}{2k-1}-\sqrt{3}\,\text{arc tang}\,\frac{h\sqrt{3}}{2k\,(h+1)-h}\right]-\frac{1}{n}$$

где

$$k=\sqrt[3]{\frac{1}{n}}$$

а затем по приближенной формуле, беря то или другое число ординат, которые все будут вычислены по уравнению кривой, и, таким образом, результаты не будут зависеть от несовершенства чертежа. Из этих вычислений мы получим:

Точное значение величины . . . . . $\frac{S}{a}=0.83512$

Значение, вычисленное по формуле Чебышева при 7 ординатах . . . . $\frac{S}{a}=0.83543$

Значение, вычисленное по формуле Чебышева при 5 ординатах . . . . $\frac{S}{a}=0.83476$

Значение, вычисленное по формуле Симпсона при 8 ординатах . . . . $\frac{S}{a}=0.83415$

Для того чтобы можно было судить о форме кривой, приведем отношения $\frac{y}{a}$ для 8 равноотстоящих абсцисс:

$z=0;\quad \frac{y}{a}=1$ $\qquad$ $z=\frac{5}{8};\quad \frac{y}{a}=0.8853$

$z=\frac{1}{8};\quad \frac{y}{a}=0.9998$ $\qquad$ $z=\frac{6}{8};\quad \frac{y}{a}=0.7660$

$z=\frac{2}{8};\quad \frac{y}{a}=0.9959$ $\qquad$ $z=\frac{7}{8};\quad \frac{y}{a}=0.5351$

$z=\frac{3}{8};\quad \frac{y}{a}=0.98205$ $\qquad$ $z=1;\quad y=0$

$z=\frac{4}{8};\quad \frac{y}{a}=0.9492$

Подобные вычисления для одного из типовых шпангоутов кормовой части (шпангоут этот находится на расстоянии $\frac{1}{3}$ полудлины корабля, считая от кормового перпендикуляра), уравнение которого имеет вид

$$\frac{y}{a}=\frac{1-z^3}{1+nz^3},\quad n=2.8927$$

дают следующие результаты

$$\frac{S}{a}=\frac{1}{a}\int ydz=\left(1+\frac{1}{n}\right)\frac{k}{3}\left(\frac{1}{2}\log\frac{1+k^2}{1-k+k^2}+\sqrt{3}\,\text{arc tang}\,\frac{\sqrt{3}}{2k-1}\right)-\frac{1}{n}$$

где

$$k=\sqrt[3]{\frac{1}{n}}$$

и точное значение интеграла будет

$$\frac{S}{a}=0.5903$$

Вычисляя по формуле Чебышева и беря 7 ординат, мы получим 0.5904; формула Симпсона с 10 ординатами дает 0.5914, а с 8 ординатами 0.5942.

Чтобы можно было легче вычертить форму этого шпангоута, привожу значения отношений $\frac{y}{a}$ для 10 ординат, равноотстоящих друг от друга:

z	$\frac{y}{a}$	z	$\frac{y}{a}$
0	1.00000	0.6	0.48250
0.1	0.99613	0.7	0.32982
0.2	0.96955	0.8	0.19670
0.3	0.89722	0.9	0.08720
0.4	0.78980	1.0	0.00000
0.5	0.65660		
	$a=1.1872$ Осадка $T=1.$		

Равным образом для грузовой ватерлинии того же корабля, носовая оконечность которого соответствует уравнению

$$y=a\frac{1-\left(\frac{x}{L}\right)^3}{1-u\left(\frac{x}{L}\right)^3};\quad \log u=1.40115$$

а кормовая оконечность — тому же уравнению, но со значениями параметров

$$\log u_1=1.58516 \quad \text{и} \quad L_1=L(1+\Delta);\quad \log(1+\Delta)=0.020493$$

получаем следующие результаты:

Точное значение всей площади	0.80662 площади прямоугольника
Формула Чебышева дает:	
с 14 ординатами (7 для носовой оконечности, 7 для кормовой оконечности)	0.80654
с 9 ординатами	0.80638
с 7 ординатами	0.80756
Формула Симпсона (21 ордината)	0.80642
Формула трапеций (21 ордината)	0.80334
Формула трапеций с 21 главной ординатой и 3 промежуточными в носовой оконечности и 3 — в кормовой оконечности (абсциссы: 0.75, 0.85, 0.95)	0.80665

Значения ординат будут следующие:

x	Кормовая оконечность	x	Носовая оконечность
0	1.00000	0	1.00000
$0.1L$	0.99948	$0.1L$	0.99926
0.2	0.99573	0.2	0.99401
0.3	0.98549	0.3	0.97965
0.4	0.96514	0.4	0.95128
0.5	0.93042	0.5	0.90116
0.6	0.87583	0.6	0.82911
0.7	0.79336	0.7	0.71914
0.75	0.73802	0.75	0.64686
0.8	0.67049	0.8	0.56025
0.85	0.58775	0.85	0.45647
0.9	0.48579	0.9	0.33195
0.95	0.35877	0.95	0.18193
1.0	0.19841	1.0	0.00000
$(1+\Delta)L$	0.00000		

Этих примеров достаточно, чтобы судить о точности формулы Чебышева.

Приложение 2-е

Численные примеры

Для примера применим наши методы к вычислению элементов корабля типа „Trafalgar“. Не имея в своем распоряжении чертежей в метрическом масштабе, мы взяли теоретический чертеж в масштабе 1 : 48 и, чтобы не затруднять читателей футами и дюймами, предполагаем, что чертеж выполнен в масштабе 1 : 50, и производим вычисление в этом предположении, применяя метрические меры.

I. Вычисление водо

Длина корабля L=106.83 м,

Ватерлинии \ Шпангоуты	Кормовая оконечность			
	9	8	7	6
	x_9=—48.7 м	x_8 = — 32.11 м	x_7=—28.25 м	x_6 = — 8.97 м
I z_1 = 3.51	7.80	17.52	18.68	21.10
II z_2 = 2.10	4.75	16.60	18.10	21.05
III z_3 = 1.29	3.00	15.70	17.40	20.90
IV z_4 = 0	1.45	13.35	15.65	20.40
V z_5 = — 1.29	0.75	9.70	12.40	19.20
VI z_6 = —2.10	0.50	6.90	9.50	17.60
VII z_7 = — 3.51	0.40	2.00	3.00	8.90
Суммы столбцов . .	18.65	81.77	94.73	129.15

Водоизмещение $D = \frac{2LTS}{9 \cdot 7} = \frac{2 \cdot 106.83 \cdot 7.94}{9 \cdot 7} \cdot \frac{774.27}{2} = 10\,450$ м³

Примечание. Все ординаты взяты в сантиметрах чертежа; так, 7.80 означает,

Гораздо проще пересчитывать окончательный результат, чем каждую ординату. Этим

II. Вычисление координат

	Ордината центра величины C_0		
Суммы ординат верхних ватерлиний .	141.55	135.99	131.35
Суммы ординат нижних ватерлиний . .	43.50	92.70	107.00
Разности	98.05	43.29	24.35
z	3.51	2.10	1.29
Произведения разностей на z	344.2	91.9	31.4
Сумма произведений	M = 467.5		

Возвышение C_0 над IV ватерлинией:

$$z_0 = \frac{M}{S} = \frac{467.5}{774.27} = 0.604 \text{ м}$$

Центр величины располагается под ГВЛ на расстоянии

$$h_0 = \frac{T}{2} - z_0 = 3.97 - 0.60 = 3.37 \text{ м}$$

измещения

осадка $T = 7.94$ м

⊠	Носовая оконечность				Сумма строк
5	4	3	2	1	
$x_5 = 0$	$x_4 = 8.97$ м	$x_3 = 28.25$ м	$x_2 = 32.11$ м	$x_1 = 48.7$ м	
21.20	21.00	16.50	14.50	3.25	141.55
21.20	20.95	15.15	14.10	3.09	135.99
21.15	20.80	15.80	13.70	2.90	131.35
20.70	20.28	14.95	12.85	2.55	122.18
19.60	19.05	13.30	11.10	1.90	107.00
18.20	17.55	11.50	9.50	1.45	92.70
10.10	9.60	5.10	3.90	0.50	43.50
132.15	129.23	93.30	79.65	15.64	$S = 774.27$

что ордината $y_3 = 7.80$ см на чертеже $= 3.90$ м в натуре, так как масштаб чертежа 1:50. объясняется присутствие множителя $\frac{1}{2}$ в формуле для водоизмещения.

центра величины

Абсцисса центра величины C_0				
Суммы ординат кормовых шпангоутов	18.65	81.77	94.73	129.15
Суммы ординат носовых шпангоутов .	15.64	79.65	93.30	129.23
Разности	3.01	2.12	1.43	−0.08
x	48.70	32.11	28.25	8.97
Произведения разностей на x	144.7	68.1	40.4	−0.7
Сумма произведений	$N = 254.5$			

Абсцисса точки C_0:

$$x_0 = \frac{N}{S} = \frac{254.5}{774.27} = 0.33 \text{ м в корму}$$

III. Вычисление метацентрических радиусов

Возвышение малого метацентра над C_0

№№ сечений	ординаты ватерлинии a	кубы ординат a^3
1	3.28	35
2	14.57	3093
3	16.56	4541
4	20.09	8108
5	21.26	9528
6	21.12	9421
7	18.75	6592
8	17.70	5545
9	8.70	659
	Сумма . . .	47 522

Малый метацентрический радиус

$$\rho_0 = \frac{7}{3}\,\frac{\Sigma a^3}{TS} =$$

$$= \frac{7}{3} \cdot \frac{47\,522}{7.94 \cdot 774.27} \cdot \frac{1}{4}\,^{1} = 4.51 \text{ м}$$

Возвышение большого метацентра над C_0

I	II	III	IV	V	VI
№№ сечений	Сумма соответств. ординат a	log II	2 log x	log ax^2	ax^2
1 и 9	11.98	1.0785	3.3749	4.4534	28 410
2 и 8	32.27	1.5088	3.0133	4.5221	33 270
3 и 7	35.31	1.5479	2.9019	4.4498	28 170
4 и 6	41.21	1.6150	1.9056	3.5206	3 316
				Сумма . . .	93 166

Большой метацентрический радиус

$$H = \frac{7\,\Sigma ax^2}{TS} = \frac{7 \cdot 93\,166}{7.94 \cdot 774.27} = 106.1 \text{ м}$$

[1] Множитель $\frac{1}{4}$ происходит оттого, что ординаты a взяты в сантиметрах чертежа; следовательно, чтобы перевести их в метры, учитывая, что масштаб равен 1 : 50, следует делить их на 2, а кубы их — на 8. Но так как S также выражено в сантиметрах, то следовало бы делить его на 2. Итак, в итоге следует делить на 4, чтобы получить ρ_0 в метрах.

Вычисление остойчивости

Первая вспомогательная ватерлиния OH_1;
угол наклонения $\theta_1 = 10° = 0.1745$

№№ сечений	Входящие ординаты a_1	Выходящие ординаты b_1	a_1+b_1	a_1-b_1	$(a_1+b_1)(a_1-b_1) = a_1^2-b_1^2$	a_1^3	b_1^3
1	3.35	3.30	6.55	+0.05	+ 0.3	38	36
2	15.00	14.50	29.50	+0.50	+14.8	3375	3049
3	17.00	16.60	33.60	+0.40	+13.4	4913	4574
4	21.15	21.30	42.45	— 0.15	— 4.5	9461	9664
5	21.40	21.50	42.90	—0.10	— 4.3	9800	9938
6	21.20	21.30	42.50	—0.10	— 4.2	9528	9664
7	19.20	18.50	37.70	+0.70	+26.4	7078	6332
8	18.25	17.10	35.35	+1.15	+40.6	6078	5000
9	9.90	7.50	17.40	+2.40	+41.8	970	422
	Суммы	$q_1 = 288.0$			+137.3	51 241	48 679
					—13.0		51 241
				$Q_1 = 124.3$		$\Sigma(a_1^3+b_1^3) = 99\,920$	

$$e_1 = \frac{1}{2}\frac{Q_1}{q_1} = \frac{1}{2}\cdot\frac{124.3}{288.0} = 0.21$$

$$p_1 = \frac{1}{2}e_1\theta_1 = \frac{1}{2}\cdot 0.21\cdot 0.1745 = 0.017$$

Вторая вспомогательная ватерлиния H_1H_2; угол наклонения $\theta_2 = 18°.5$
(отвечает погружению кромки верхней палубы в воду)

$$\eta_1 = e_1 + \frac{1}{2}e_1\left(\frac{\theta_2-\theta_1}{\theta_1} + \frac{\theta_1}{\theta_2-\theta_1}\right) = 0.21 + \frac{1}{2}0.21\left(\frac{8.5}{10} + \frac{10}{8.5}\right) = 0.42$$

№№	a_2	b_2	a_2+b_2	a_2-b_2	$a_2^2-b_2^2$	a_2^3	b_2^3
1	3.0	3.4	6.4	—0.4	— 2.6	27	39
2	15.3	15.1	30.4	+0.2	+ 6.1	3582	3443
3	17.2	17.2	34.4	—0.0	— 0.0	5088	5088
4	21.2	22.1	43.3	—0.9	—38.9	9528	10 794
5	21.4	22.5	43.9	—1.1	—48.3	9800	11 391
6	21.3	22.2	43.5	—0.9	—39.2	9664	10 941
7	19.4	18.5	37.9	+0.9	+34.1	7301	6332
8	18.5	17.0	35.5	+1.5	+53.3	6332	4913
9	10.3	7.3	17.6	+3.0	+52.8	1093	389
		$q_2 = 292.9$			+146.3	52 415	53 330
					—129.0		52 415
				$Q_2 = +17.3$		$\Sigma(a_2^3+b_2^3) = 105\,745$	

$$e_2 = \frac{1}{2}\frac{Q_2}{q_2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{17.3}{292.8} = 0.030$$

$$p_2 = p_1\frac{q_1}{q_2} + \frac{1}{2}(\theta_2-\theta_1)\left(e_2+e_1\frac{q_1}{q_2} - \eta_1\frac{q_1}{q_2}\right) = 0.004$$

Третья вспомогательная ватерлиния H_2H_3; угол наклонения $\theta_3 = 24°5$

$$\theta_3 - \theta_2 = 6° = 0.1047$$

$$\eta_2 = e_2\left(1 + \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1}\right) + \frac{p_2}{\theta_3 - \theta_2} + \frac{p_1 - p_2}{\theta_2 - \theta_1} \cdot \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 - \theta_1} =$$

$$= 0.03\left(1 + \frac{6}{8.5}\right) + \frac{0.004}{0.105} + \frac{0.013}{0.147} \cdot \frac{6}{8.5} =$$

$$= 0.051 + 0.038 - 0.062 = +0.151$$

№№	a_3	b_3	$a_3 + b_3$	$a_3 - b_3$	$a_3^2 - b_3^2$	a_3^3	b_3^3
1	3.2	4.0	7.2	—0.8	— 5.8	33	64
2	16.1	15.3	31.4	+0.8	+ 25.1	4173	3582
3	17.1	17.3	34.4	—0.2	— 6.9	5000	5177
4	17.1	22.2	39.3	—5.1	—200.4	5000	10941
5	17.1	22.6	39.7	—5.5	—218.4	5000	11543
6	17.1	22.3	39.4	—5.2	—204.9	5000	11090
7	17.1	18.1	35.2	—1.0	— 35.2	5000	5930
8	17.1	16.4	33.5	+0.7	+ 23.4	5000	4411
9	10.9	6.9	17.8	+4.0	+ 71.2	1295	329
			277.9		+119.7	35501	53167
	Поправки . . .		13.1		+519.4		35501
					—671.6	Поправка	15720
			$q_3 = 291.0$		$Q_3 = -32.5$		$\sum (a_3^3 + b_3^3) = 104\,388$

$$e_3 = \frac{1}{2}\frac{Q_3}{q_3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{32.5}{291.0} = -0.056$$

$$p_3 = p_2\frac{q_2}{q_3} + \frac{1}{2}(\theta_3 - \theta_2)\left(e_3 + e_2\frac{q_2}{q_3} - \eta_2\frac{q_2}{q_3}\right) = -0.005$$

Примечание. Каземат, длина которого составляет 0.3 длины корабля, занимает центральную часть корабля. Ординаты a_3 отвечают пересечению вспомогательной ватерлинии с верхней палубой корабля вне каземата. Ордината погружения каземата, считая от пересечения нашей ватерлинии с упомянутой палубой, равна 4.8, расстояние от ее середины до палубы H_2 равно 20; следовательно, момент сечения каземата вспомогательной ватерлинией равен $4.8 \cdot 20 \cdot 0.3L$. Представим этот момент выражением $\frac{1}{2}\frac{L}{9}Q_3$; следовательно, чтобы получить Q_3, необходимо к $\sum (a_3^2 - b_3^3)$ прибавить $4.8 \cdot 20 \cdot 0.3 \cdot 2 \cdot 9 = 519.4$. Точно также, чтобы получить полную площадь рассматриваемой ватерлинии, следует прибавить к $\sum (a_3 + b_3)$ количество $4.8 \cdot 0.3 \cdot 9 = 13.1$. Также для момента инерции необходимо к $\sum (a_3^3 + b_3^3)$ прибавить количество $4.8 \cdot 0.3 \cdot (20)^2 \cdot 9 \cdot 3 = 15\,720$. Для этих поправок мы легко можем составить общую формулу.

Четвертая вспомогательная ватерлиния H_3H_4; угол наклонения $\theta_4 = 31°$

(погружение кромки палубы каземата)

$$\theta_4 - \theta_3 = 6°.5 = 0.1134$$

$$\eta_3 = e_3\left(1 + \frac{\theta_4 - \theta_3}{\theta_3 - \theta_2}\right) + \frac{p_3}{\theta_4 - \theta_3} + \frac{p_2 - p_3}{\theta_3 - \theta_2} \cdot \frac{\theta_4 - \theta_3}{\theta_3 - \theta_2} =$$

$$= -0.056\left(1 + \frac{6.5}{6}\right) + \frac{0.005}{0.113} + \frac{0.023 - 0.009}{0.105} \cdot \frac{6.5}{6} = 0.069$$

№№	a_4	b_4	$a_4 + b_4$	$a_4 - b_4$	$a_4^2 - b_4^2$	a_4^3	b_4^3
1	3.0	4.6	7.6	—1.6	— 12.1	27	97
2	13.7	15.8	29.5	—2.1	— 62.0	2571	3944
3	13.7	17.8	31.5	—4.1	—129.1	2571	5640
4	13.7	22.4	36.1	—8.7	—314.0	2571	11 239
5	13.7	22.8	36.5	—9.1	—332.1	2571	11 852
6	13.7	22.4	36.1	—8.7	—314.0	2571	11 239
7	13.7	17.8	31.5	—4.1	—129.1	2571	5640
8	13.7	16.1	29.8	—2.4	— 71.5	2571	4173
9	11.1	6.9	18.0	+4.2	+ 75.6	1368	329
			256.6		+ 75.6	19 392	54 153
	Поправки . . .		24.0		+ 811.0		24 113
					—1363.9		19 392
			$q_4 = 280.6$		$Q_4 = -477.3$	$\sum (a_4^3 + b_4^3) = 97\,658$	

$$e_4 = \frac{1}{2}\frac{Q_4}{q_4} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{477.3}{280.6} = -0.850$$

$$p_4 = p_3\frac{q_3}{q_4} + \frac{1}{2}(\theta_4 - \theta_3)\left(e_4 + e_3\frac{q_3}{q_4} - \eta_3\frac{q_3}{q_4}\right) = -0.052$$

Ордината каземата . . . . . $= 8.9$

Расстояние от ее середины до H_3 $= 18.3$

Поправка для Q_4 . . . . . $= 8.9 \cdot 18.3 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 0.3 = +811$

Поправка для q_4 . . . . . $= 8.9 \cdot 0.3 \cdot 9 = +24.0$

Поправка для $\sum (a_4^3 + b_4^3)$ . . $= 8.9 \cdot 0.3 \cdot 9 \cdot 3 \cdot (18.3)^2 = 24\,113$

Мы не будем продолжать далее построение равнообъемных ватерлиний, так как уже этих вычислений достаточно для того, чтобы понять метод; в то же время они показывают, что вспомогательные ватерлинии практически могут служить в качестве равнообъемных, так как все поправки p_i (они вычислены в сантиметрах чертежа и, следовательно, чтобы получить их значение в натуре, их следует умножить на 50) не превышают 2 см в натуре.

Последние вычисления производятся следующим образом.

Вычисление ρ_i и λ_i

$$\rho_i = \frac{7}{3}\,\frac{\Sigma\,(a_i^3 + b_i^3)}{2TS}\,; \qquad \lambda_i = \frac{7}{2}\,\frac{q_i\,\eta_i^2 - \theta_i\,\eta_i}{2TS}$$

Вычисление ρ_i					Вычисление λ_i			
	I	II	III	IV		I	II	III
i	$\Sigma\, a_i^3 + b_i^3$	log I	$\log \rho_i = \log \mathrm{I} + \bar{5}.9772$	ρ_i	i	$q_i\eta_i^2$	$-Q_i\eta_i$	$\lambda_i = \mathrm{II} \times 0.000142$
0	95 044	4.9770	0.9551	9.018	0	0	0	0
1	99 920	4.9997	0.9769	9.482	1	49	—7	0.007
2	105 745	5.0242	1.0014	10.033	2	7	+ 5	0.002
3	104 388	5.0187	0.9959	9.906	3	1	+33	0.005
4	97 658	4.9897	0.9669	9.266				

Вычисление координат центра величины (верхний предел)

$$y_{i+1} - y_i = \frac{1}{2}\,(\rho_{i+1} + \rho_i)\,(\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i) + \lambda_i\,(\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i)$$

$$z_{i+1} - z_i = \frac{1}{2}\,(\rho_{i+1} + \rho_i)\,(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1}) + \lambda_i\,(\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1})$$

i	θ_i	I	II	III	IV
		$\frac{1}{2}(\rho_{i+1} + \rho_i) + \lambda_i$	$\sin\theta_i$	$\cos\theta_i$	$\sin\theta_{i+1} - \sin\theta_i$
0	0.0	9.250	0.0000	1.0000	0.1736
1	10.0	9.764	0.1736	0.9848	0.1437
2	18.5	9.972	0.3173	0.9483	0.0974
3	24.5	9.591	0.4147	0.9100	0.1003
4	31.0	9.591	0.5150	0.8572	0.1003

i	V	VI	VII	VIII	IX
	$\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1}$	$y_{i+1} - y_i = \mathrm{I} \times \mathrm{IV}$	$z_{i+1} - z_i = \mathrm{I} \times \mathrm{V}$	y_i	z_i
0	0.0152	1.606	0.140	0.000	0.000
1	0.0365	1.402	0.364	1.606	0.140
2	0.0383	0.971	0.382	3.008	0.504
3	0.0528	0.961	0.506	3.979	0.886
4	0.0528	0.961	0.506	4.940	1.394

Вычисление плеч остойчивости формы (верхний предел)

$$r_i = y_i \cos\theta_i + z_i \sin\theta_i$$

i	θ	I	II	III	IV
		$y_i \cos\theta_i$	$z_i \sin\theta_i$	$r_i = \text{I} + \text{II}$ (в сантиметрах чертежа)	r_i Натур. величина (метры)
0	0°	0	0	0	0
1	10.0	1.582	0.024	1.606	0.803
2	18.5	2.853	0.159	3.012	1.506
3	24.5	3.621	0.367	3.988	1.994
4	31.0	4.234	0.718	4.952	2.476

Прежде чем вычислить $y_{i+1} - y_i$, необходимо сделать следующее замечание: до тех пор, пока верхняя палуба не погружена в воду и обводы корабля непрерывны, т. е. пока θ_2 равен 18°.5, значения ρ_i в этих формулах будут такими же, как и в предыдущих, но как только верхняя палуба погружается, они перестают быть такими. В самом деле, справляясь по таблицам для наклонений $\theta_3 = 24°.5$ и $\theta_4 = 31°$, видим, что мы прибавили к сумме кубов ординат поправки на каземат.

В формуле для $y_{i+1} - y_i$, которую мы хотим вычислить, величины ρ_i заменяют отношение суммы кубов ординат к водоизмещению; следовательно, мы должны принять

$$\rho_3 = \frac{7}{3} \cdot \frac{53\,167 + 35\,501}{2TS} = 8.414$$

и

$$\rho_4 = \frac{7}{3} \cdot \frac{54\,153 + 19\,392}{2TS} = 6.980$$

и затем придется прибавить к $y_{i+1} - y_i$ поправки, происходящие от погружения частей каземата.

Поправки для каземата. Уже было сказано, что каземат занимает в средней части корабля 0.3 его общей длины. Погруженная часть представляет, следовательно, прямую призму. Поправка величин $y_{i+1} - y_i$ есть отношение момента этой призмы к водоизмещению, причем момент берется относительно оси, проходящей через H. Имеем

Наклонение 24°.5; площадь сечения = 5; ордината y ее центра тяжести = 18.5

Момент погруженной призмы $= 5 \cdot 18.5 \cdot 0.3L$ „ z „ „ „ = 7.9

Водоизмещение $D = \frac{2TSL}{9 \cdot 7}$

Поправка $\Delta y_3 = \frac{5 \cdot 18.5 \cdot 0.3 \cdot 63}{2TS} = 0.071$, $\Delta z_3 = 0.029$

Равным образом

Наклонение 31°; площадь сечения = 14.3; ордината $y = 16{,}5$

$z = 9.2$

Поправка $\Delta y_4 = \dfrac{14.3 \cdot 16.5 \cdot 0.3 \cdot 63}{2TS} = 0.181$ $\Delta z_4 = 0.101$

Вычисление нижнего предела плеч остойчивости

Вычисление нижнего предела плеч остойчивости требует в первую очередь вычисления сумм

$$\sum [(a_i + a_{i+1})^3 + (b_i + b_{i+1})^3]$$

которые служат для нахождения значения R_i.

Вычисление R_i

$$R_i = \frac{7}{3} \frac{\sum [(a_i + a_{i+1})^3 + (b_i + b_{i+1})^3]}{2TS} \qquad \left(\log \frac{7}{3} \frac{1}{2TS} = 5{,}9172\right)$$

$i=0$		$i=1$		$i=2$		$i=3$	
$a_i + a_{i+1}$ $b_i + b_{i+1}$	Кубы / 100	$a_i + a_{i+1}$ $b_i + b_{i+1}$	Кубы / 100	$a_i + a_{i+1}$ $b_i + b_{i+1}$	Кубы / 100	$a_i + a_{i+1}$ $b_i + b_{i+1}$	Кубы / 100
6.63	2.9	6.35	2.5	6.2	2.4	6.2	2.4
29.57	258.4	30.30	278.2	31.4	309.6	29.8	264.6
33.56	377.9	34.20	400.0	34.3	403.5	30.8	292.2
41.24	701.3	42.35	759.9	38.3	561.8	30.8	292.2
42.60	773.1	42.80	784.0	38.5	570.7	30.8	292.2
42.42	763.3	42.50	767.7	38.4	566.2	30.8	292.2
37.95	546.5	38.60	575.1	36.5	486.3	30.8	292.2
35.95	464.6	38.75	581.9	35.6	451.2	30.8	292.2
18.60	64.3	20.20	84.4	21.2	95.3	20.0	92.6
6.58	2.9	6.70	3.0	7.4	4.0	8.6	6.4
29.07	245.6	29.60	259.3	30.4	280.9	31.1	300.8
33.16	364.6	33.80	386.1	34.5	410.6	35.1	432.4
41.39	714.2	43.40	817.5	44.3	869.4	44.6	887.2
42.70	778.5	44.00	851.8	45.1	917.3	45.4	935.8
42.42	763.3	43.50	823.1	44.5	881.2	45.7	954.1
37.25	516.9	35.60	451.2	36.6	490.3	35.9	462.7
34.80	421.4	34.10	396.5	33.4	372.6	32.5	343.3
16.20	42.5	14.80	32.4	14.2	28.6	13.8	26.3
$\sum$ = Суммы	7802.2		8252.2		7701.9		6464.1
$2 + \log \sum$	5.8922		5.9166		5.8866		5.8105
$\log R_i$ . . .	1.8694		1.8938		1.8638		1.7877
R_i	74.03		78.31		73.08		61.34

Вычисление координат центров величины (нижний предел)

$$y_{i+1} - y_i = \frac{1}{12}\left[(R_i - 2\rho_i)\cos\theta_{i+1} + (R_i - 2\rho_{i+1})\cos\theta_i + \right.$$
$$\left. + l_i\cos\theta_{i+1} + m_i\cos\theta_i\right]\sin(\theta_{i+1} - \theta_i)$$

$$z_{i+1} - z_i = \frac{1}{12}\left[(R_i - 2\rho_i)\sin\theta_{i+1} + (R_i - 2\rho_{i+1})\sin\theta_i + \right.$$
$$\left. + l_i\sin\theta_{i+1} + m_i\cos\theta_i\right]\sin(\theta_{i+1} - \theta_i)$$

$$l_i = 7\,\frac{(q_i - q_{i+1})\eta_i^2 - 2Q_i\eta_i}{2TS}$$

$$m_i = 7\,\frac{(q_i + q_{i+1})\eta_i^2 - 2(Q_i + Q_{i+1})\eta_i}{2TS}$$

Вычисление l_i				Вычисление m_i			
	I	II	III		I	II	III
i	$(q_i - q_{i+1})\eta_i^2$	$-2Q_i\eta_i$	(I + II) × × 0.000284 = l_i	i	$(q_i + q_{i+1})\eta_i^2$	$-2(Q_i + Q_{i+1})\eta_i$	(I + II) × × 0.000284
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	—14	—0.004	1	101	—118	—0.005
2	0	+10	+0.003	2	14	+ 5	+0.005
3	0	+66	+0.019	3	3	— 72	—0.020

Вычисление y_i (нижний предел)

i	θ_i	I	II	III	IV	V
		R_i	$2\rho_i$	$2R_i - 2\rho_i + l_i$	III × $\cos\theta_{i+1}$	$R_i - 2\rho_{i+1} + m_i$
0	0.0	74.03	18.04	55.99	55.13	55.07
1	10.0	78.31	18.96	59.35	56.29	58.24
2	18.5	73.08	20.07	53.01	48.24	56.25
3	24.5	61.34	16.83	44.53	37.96	47.42
4	31.0	61.34	13.96	44.53	37.96	47.42

i	θ_i	VI	VII	VIII	IX	X
		V × $\cos\theta_i$	IV + VI	$\frac{1}{12}$ VII × × $\sin(\theta_{i+1} - \theta_i)$	$y_{i+1} - y_i$ = VIII + + поправка для каземата	y_i
0	0°0	55.07	110..0	1.596	1.596	0
1	10.0	57.35	113.64	1.396	1.396	1.596
2	18.5	53.30	101.54	0.884	0.955	2.992
3	24.5	43.13	81.09	0.765	0.946	3.947
4	31.0	43.13	81.09	0.765	0.946	4.893

Вычисление z_i (нижний предел)

i	θ_i	I $(R_i - 2\rho_i + l_i) \times \sin\theta_{i+1}$	II $(R_i - 2\rho_{i+1} + m_i) \times \sin\theta_i$	III I+II	IV $\frac{\text{III} \times \sin(\theta_{i+1} - \theta_i)}{12}$	V $z_{i+1} - z_i$ = IV + поправка для каземата	VI z_i
0	0°0	9.73	0.00	9.73	0.140	0.140	0.000
1	10.0	18.82	10.11	29.93	0.356	0.356	0.140
2	18.5	21.99	17.83	39.82	0.348	0.377	0.496
3	24.5	22.93	19.66	42.59	0.402	0.503	0.873
4	31.0	22.93	19.66	42.59	0.402	0.503	1.376

Вычисление плеча отстойчивости формы (нижний предел)

$r_i = y_i \cos\theta_i + z_i \sin\theta_i$

i	θ_i	I $y_i \cos\theta_i$	II $z_i \sin\theta_i$	III r_i = I + II (в сантиметрах чертежа)	IV r_i натур. величина (метры)
0	0°0	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10.0	1.573	0.024	1.597	0.799
2	18.5	2.838	0.157	2.995	1.497
3	24.5	3.592	0.362	3.954	1.977
4	31.0	4.195	0.709	4.904	2.452

Из этого примера видно, насколько ограничены пределы изменения плеч остойчивости формы; можно, следовательно, удовольствоваться верхним пределом, вычисление которого гораздо легче, чем вычисление нижнего предела, но это последнее отличается бо́льшей точностью.

Что касается вычисления остойчивости веса (член: $a \sin\theta$), то оно не представляет никаких затруднений, поскольку a известно.

Наконец, для получения динамической остойчивости нам остается только проинтегрировать графически диаграмму статической остойчивости.

ПО ПОВОДУ СТАТЬИ „НОВЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ПЛОЩАДЕЙ“ [1]

В № 11 журнала „Кораблестроитель“ за 1928 г. помещен перевод статьи японского инженера Сейнен-Иокота под приведенным выше заглавием; по поводу этой статьи я считаю полезным сделать несколько замечаний.

1) Метода С.-Иокота является отнюдь не новой и в статье П. Л. Чебышева „Sur les quadratures“ (J. de math. pures et appl. J. Liouville, 1874), вошедшей под № 9 во второй том собрания сочинений Чебышева, им решается такой вопрос: определить величины k, x_1, x_2, ..., x_m так, чтобы выразить *возможно точно* интегралы вида $\int_{-1}^{+1} F(x)\varphi(x)\,dx$, где $F(x)$ — заданная функция, $\varphi(x)$ — какая угодно функция, формулою вида

$$\int_{-1}^{+1} F(x)\varphi(x)\,dx = k[\varphi(x_1) + \varphi(x_2) + \ldots + \varphi(x)_m] \qquad (1)$$

причем величины k, x_1, x_2, ..., x_m не зависят от вида функции $\varphi(x)$.

Чебышев решает этот вопрос в самом общем виде, затем берет ряд примеров, задавая функцию $F(x)$.

Так, в § 5 своей статьи он полагает $F(x)=1$ и получает свою формулу для вычисления площадей.

В § 9 он полагает $F(x)=x$ и, заметив, что когда $\int_{-1}^{+1} F(x)\,dx=0$, то вместо формулы (1) надо искать формулу вида

$$\int_{-1}^{+1} F(x)\varphi(x)\,dx = k[\varphi(x_1) + \varphi(x_2) + \ldots + \varphi(x_n) - \varphi(x_{n+1}) - \varphi(x_{n+2}) - \ldots - \varphi(x_{2n})] \qquad (2)$$

[1] Впервые напечатано в журнале „Кораблестроитель“ (1930, № 16—17).

он для статического момента площади пишет формулу

$$\int_{-1}^{+1} x\varphi(x)\,dx = k[\varphi(x_1) + \varphi(x_2) + \ldots + \varphi(x_n) - \varphi(x_{n+1}) - \ldots - \varphi(x_{2n})]$$

которая лишь обозначениями отличается от формулы С.-Иокота.

Затем для примера Чебышев вычисляет численные значения коэффициента k и абсцисс $x_1, x_2, \ldots, x_{2n}$ для случаев $2n=2$ и $2n=4$, т. е. для двух и четырех ординат, и получает следующие результаты

$$2n=2; \quad x_1 = \sqrt{\frac{3}{5}}; \quad x_2 = -\sqrt{\frac{3}{5}}; \quad k = \frac{5}{27}$$

$$2n=4; \quad x_1 = -x_4 = 0.89224$$

$$x_2 = -x_3 = 0.50030; \qquad k = 0.23937$$

и

$$x_1 = -x_4 = 0.84905$$

$$x_2 = -x_3 = 0.18093; \qquad k = 0.32353$$

так что, например будет

$$\int_{-1}^{+1} x\varphi(x)\cdot dx = 0.23937\,[\varphi(0.89224) + \varphi(0.50030) -$$

$$-\varphi(-0.50030) - \varphi(-0.89224)]$$

Здесь надо заметить, что статья П. Л. Чебышева в журнале Лиувилля изобилует ошибками в числах и результатах, поэтому следует обращаться к полному собранию его сочинений, где эти ошибки исправлены, или к вышедшему в том же 1874 г. второму изданию „Интегрального исчисления“ Н. Алексеева, где не только исправлены эти ошибки и опечатки, но дается более элементарный вывод формулы Чебышева.

2) Сличая вышеприведенные числа Чебышева и числа С.-Иокота, мы видим, что они совершенно различны. Спрашивается, в чем причины этого различия.

Эта причина в том, что Чебышев поставил задачу — не просто выразить интеграл формулою (1) или (2), а выразить этот интеграл *„возможно точно“* этой формулой, определяя для этого не только абсциссы, но и коэффициент k.

Иокота же, задав вперед число $k = \frac{4}{2n}$ (при обозначениях Чебышева), получает одну из бесчисленного множества формул вида (2), в которых условие о „возможной точности“ не соблюдено, но вычисление незначительно упрощено тем, что коэффициент k более простой. При заданном числе $2n$ ординат, „возможно точных“ формул Чебышева для статического

момента ограниченное число (вообще не более n); задавая же число k произвольно между некоторыми пределами, таких формул, как дает Иокота, можно составить бесчисленное множество.

3) Чтобы это различие стало еще яснее, возьмем случай $2n=4$ и выведем формулу Чебышева в параллель с выводом для того же числа ординат, данным в статье Иокота.

Функция $y=\varphi(x)$ предполагается разложенной в ряд

$$\varphi(x)=c_0+c_1x+c_2x^2+\ldots+c_nx^n+\ldots$$

тогда мы, согласно формуле (2), получим равенство

$$\begin{aligned}\int_{-1}^{+1} x\,\varphi(x)\,dx &= 2\left[\frac{c_1}{3}+\frac{c_3}{5}+\frac{c_5}{7}+\ldots\right]= \\ &= k(c_0+c_1x_1+c_2x_1^2+\ldots+c_5x_1^5+\ldots+ \\ &+c_0+c_1x_2+c_2x_2^2+\ldots+c_5x_2^5+\ldots+ \\ &-c_0-c_1x_3-c_2x_3^2-\ldots-c_5x_3^5-\ldots- \\ &-c_0-c_1x_4-c_2x_4^2-\ldots-c_5x_4^5-\ldots)\end{aligned}$$

которое должно иметь место при всяком значении букв c_0, c_1, c_2, . . ., в него входящих.

Отсюда следуют уравнения

$$\left.\begin{aligned} x_1+x_2-x_3-x_4 &= \frac{2}{3}\cdot\frac{1}{k} \\ x_1^2+x_2^2-x_3^2-x_4^2 &= 0 \\ x_1^3+x_2^3-x_3^3-x_4^3 &= \frac{2}{5}\cdot\frac{1}{k} \\ x_1^4+x_2^4-x_3^4-x_4^4 &= 0 \\ x_1^5+x_2^5-x_3^5-x_4^5 &= \frac{2}{7}\cdot\frac{1}{k} \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

которых мы берем в нашем случае *пять* по числу неизвестных k, x_1, x_2, x_3, x_4, соответственно чему и в разложении функции $\varphi(x)$ идем до членов 5-й степени относительно x, получая, таким образом, при этом числе ординат „возможную точность“.

Очевидно, что мы удовлетворим второму и четвертому уравнениям этой системы, взяв $x_4=-x_1$ и $x_3=-x_2$, т. е. симметрично расположенные ординаты, тогда у нас останется три уравнения

$$\left.\begin{aligned} x_1+x_2 &= \frac{1}{3}\cdot\frac{1}{k} \\ x_1^3+x_2^3 &= \frac{1}{5}\cdot\frac{1}{k} \\ x_1^5+x_2^5 &= \frac{1}{7}\cdot\frac{1}{k} \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Пусть уравнение

$$z^2 + p_1 z + p_2 = 0 \tag{5}$$

имеет корни x_1 и x_2. Тогда, положив

$$s_1 = x_1 + x_2; \quad s_3 = x_1^3 + x_2^3; \quad s_5 = x_1^5 + x_2^5 \tag{6}$$

будем иметь между коэффициентами p_1 и p_2 уравнения (5) и этими величинами зависимость, выражаемую формулами Ньютона

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= -p_1 \\ s_2 + p_1 s_1 + 2p_2 &= 0 \\ s_3 + p_1 s_2 + p_2 s_1 &= 0 \\ s_4 + p_1 s_3 + p_2 s_2 &= 0 \\ s_5 + p_1 s_4 + p_2 s_3 &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

из которых следует

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= -p_1 \\ s_2 &= p_1^2 - 2p_2 \\ s_3 &= -p_1^3 + 3p_1 p_2 \\ s_4 &= p_1^4 - 4p_1^2 p_2 + 2p_2^2 \\ s_5 &= -p_1^5 + 5p_1^3 p_2 - 5p_1 p_2^2 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Так как уравнения (4) дают

$$s_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{k}; \quad s_3 = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{k}; \quad s_5 = \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{k} \tag{9}$$

то из 1-го и 3-го уравнений (8) получим

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= -\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{k} \\ p_2 &= \frac{1}{27} \cdot \frac{1}{k^2} - \frac{1}{5} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

соответственно чему уравнение (5) будет

$$135k^2 z^2 - 45kz + 5 - 27k^2 = 0 \tag{5'}$$

Надо еще удовлетворить и 5-му уравнению системы (8). В нашем случае оно будет

$$\frac{1}{7k} = -p_1^5 + 5p_1^3 p_2 - 5p_1 p_2^2 \tag{11}$$

По подстановке значений (10) и упрощении оно обращается в такое

$$5832k^4 - 945k^2 + 35 = 0$$

и доставляет для k приведенные выше значения, после чего из уравнения (5′) найдутся и соответствующие две группы значений абсцисс.

С.-Иокота, задав произвольно $k=1$, последнему уравнению системы (8), а значит, и (7) не удовлетворяет, и его формула будет верна лишь для функции $\varphi(x)$ до 4-й степени относительно x, тогда как чебышевская будет верна для функции $\varphi(x)$ до 6-й степени.

Взяв $k=1$, Иокота получил уравнение

$$135z^2-45z-22=0 \tag{12}$$

или при его обозначениях

$$a^2-\frac{1}{3}a-\frac{22}{135}=0 \tag{12′}$$

которое очевидно получается из общего чебышевского уравнения (5′), положив в нем $k=1$.

Очевидно, что в уравнении (5′) можно брать k равным не только 1, как сделал Иокота, но и всякой другой величине, лишь бы корни этого уравнения оставались вещественными; полученная формула не будет обладать „возможною точностью“, но степень ее точности будет та же, как и формулы Иокота.

Возьмем, например

$$k=\sqrt{\frac{5}{27}}=0.43033$$

тогда уравнение (5′) будет

$$135k^2z-45kz=0$$

его корни будут

$$z_2=\frac{1}{3}\cdot\frac{1}{k}=\frac{1}{3}\sqrt{\frac{27}{5}}=\sqrt{\frac{3}{5}}=0.7746$$

так что будет

$$x_1=0.7746=-x_4$$
$$x_2=0=x_3$$

и формула будет

$$\int_{-1}^{+1}x\varphi(x)\,dx=\sqrt{\frac{5}{27}}\left[\varphi\left(\sqrt{\frac{3}{5}}\right)-\varphi\left(-\sqrt{\frac{3}{5}}\right)\right]=$$

$$=0.43033\,[\varphi(0.7746)-\varphi(-0.7746)] \tag{13}$$

а это есть как раз формула П. Л. Чебышева с двумя ординатами, которая, таким образом, обладает одинаковой степенью точности с формулой Иокота для четырех ординат.

4) Решив уравнение (12) или, что то же, (12′), Иокота получил его корни

$$a_1 = -0.2701$$
$$a_2 = +0.6034$$

затем он пишет: „знаки плюс и минус для нас значения не имеют, так как каждой положительной абсциссе соответствует отрицательная, и наоборот“, соответственно этому он дает своей таблице значения

$$x_1 = 0.2701$$
$$x_2 = 0.6034$$

следовательно, надо брать при его обозначениях

$$x_1 = 0.2701$$
$$x_2 = 0.6034$$

и его формула будет

$$\int_{-1}^{+1} x\varphi(x)\,dx = \{[\varphi(0.2701) - \varphi(-0.2701)] + [\varphi(0.6034) - \varphi(-0.6034)]\} \tag{14}$$

Эта формула *неверна*, и сделанная перемена знаков недопустима; формулу надо бы писать так

$$\int_{-1}^{+1} x\varphi(x)\,dx = \{[\varphi(-0.2701) - \varphi(0.2701)] + [\varphi(0.6034) - \varphi(-0.6034)]\} \tag{15}$$

Чтобы в этом убедиться, достаточно взять простейший пример, положив

$$\varphi(x) = x^3$$

Истинное значение интеграла будет

$$\int_{-1}^{+1} x\varphi(x)\,dx = \int_{-1}^{+1} x^4\,dx = \frac{2}{5} = 0.40000$$

По формуле (14), т. е. по той, которую дает Иокота, получим

$$\int_{-1}^{+1} x^4\,ax = \{[(0.2701)^3 - (-0.2701)^3] + [(0.6034)^3 - (-0.6034)^3]\} =$$
$$= 2[(0.2701)^3 + (0.6034)^3] = 2[0.0197 + 0.2197] = 0.4788$$

тогда как верная формула (15) дает

$$\int_{-1}^{+1} x^4\,dx = \left\{[(-0.2701)^3 - (0.2701)^3] + [(0.6034)^3 - (-0.6034)^3]\right\} =$$

$$= 2[(-0.2701)^3 + (0.6034)^3] = 2[-0.0197 + 0.2197] = 0.4000$$

Нетрудно проверить, что формула (13) также дает вполне верный результат, как и должно быть.

Ошибка Иокота произошла потому, что, написав исходную формулу,

$$\int_{-1}^{+1} x\varphi(x)\,dx = [\varphi(x_1) - \varphi(-x_1)] + [\varphi(x_2) - \varphi(-x_2)]$$

и получив затем значения

$$a_1 = x_1 = -0.2701$$
$$a_2 = x_2 = +0.6034$$

ему следовало эти знаки *сохранить*, ибо перемена знака при x_1 соответствует перемене знака при члене

$$[\varphi(x_1) - \varphi(-x_1)]$$

что, без соответствующей перемены знака у второго двучлена, делает формулу неверной.

Если Иокота, приводя свои числа, делал и в других местах подобную же замену знаков, то везде, где оно сделано, формулы *неверны*.

5) Я не потому вошел во все эти подробности, что формулы Иокота имели бы значение в кораблестроительных вычислениях, — ими пользоваться не будут, ибо для этого сперва надо разметить на основной линии место новых ординат и снять их, что потребует гораздо больше времени, нежели вычисление по имеющимся уже ординатам, например по правилу трапеций, а для того чтобы *предостеречь от имеющейся привычки считать все, что носит заграничный штамп, за непреложную истину и откровение*, а это далеко не всегда правильно.

О ПРОГРЕССИВНЫХ ИСПЫТАНИЯХ КОРАБЛЕЙ [1]

Чтобы выработать способы производства прогрессивных испытаний, необходимо прежде всего установить:

а) требуемую степень точности результатов их,

б) практически достижимую степень точности *простыми приборами*, не требующими длительной специальной установки на корабле,

в) причины неизбежных при наблюдениях погрешностей и способы уменьшения их до требуемых пределов,

г) пределы неустранимых погрешностей наблюдений.

§ **1.** Необходимо различать две скорости корабля:

1) наблюдаемую относительно береговых предметов (дна) и

2) вычисляемую по наблюдениям скорость относительно воды, которая, собственно, и нужна. Эта последняя требует исключения скорости течения из наблюденной скорости относительно дна.

Это исключение по наблюдениям только с корабля *точно* сделано быть не может и требует некоторой гипотезы.

В самом деле, рассмотрим два последовательных пробега в противоположных направлениях, сделанных при столь близком числе оборотов n_1, n_2, что аванс можно считать постоянным.

Сделаем следующие обозначения:

a — аванс на один оборот;

V_1, V_2 — наблюденные скорости;

W_1, W_2 — скорости течения;

U_1, U_2 — скорость относительно воды;

тогда будет

$$V_1 = U_1 + W_1$$
$$V_2 = U_2 - W_2$$
$$U_1 = n_1 a$$
$$U_2 = n_2 a$$

---

[1] Впервые напечатано в „Бюллетене НТК УВМС РККА“ (1931, № 5).

Как видно, уравнений имеем *четыре*, а неизвестных *пять*:

$$U_1,\ U_2,\ W_1,\ W_2,\ a$$

Обыкновенно, не оговаривая, делают *произвольное* допущение, что

$$W_1 = W_2$$

тогда

$$a = \frac{V_1 + V_2}{n_1 + n_2}$$

и т. д.

Если сделано *три* пробега, то при принятом обозначении будет

$$V_1 = U_1 + W_1$$
$$V_2 = U_2 - W_2$$
$$V_3 = U_3 + W_3$$
$$U_1 = n_1 a$$
$$U_2 = n_2 a$$
$$U_3 = n_3 a$$

Уравнений будет *шесть*, а неизвестных *семь*

$$U_1,\ U_2,\ U_3,\ W_1,\ W_2,\ W_3,\ a$$

Обычное комбинирование

$$U_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{V_2 + V_3}{2}\right) = \frac{1}{4}(V_1 + 2V_2 + V_3)$$

и следующее из него

$$U_0 = \frac{1}{4}(n_1 + 2n_2 + n_3) \cdot a$$

заключает *произвольное* допущение

$$W_2 = \frac{W_1 + W_3}{2}$$

В анализ того, каким образом путем последовательных приближений исключать течение, входить не будем (это имеется в делах Бассейна при произведенных мною прогрессивных испытаниях 1900 — 1908 гг. и в моей статье в „Бюллетене НТК“ за 1929 г.), во всяком случае это исключение всегда основано на некоторой гипотезе более или менее произвольной и *тем менее точно, чем продолжительность, а, значит, и длина пробегов больше*, поэтому необходимо пробеги делать возможно *короткие*.

§ 2. Практически достижимая и вполне достаточная точность в определении *наблюдаемых* скоростей составляет около $\frac{1}{2}\%$. Бо́льшей точно-

сти без особых, трудно на корабле осуществимых приспособлений, достигнуть *нельзя*.

Точность этих наблюдений зависит от следующих обстоятельств:

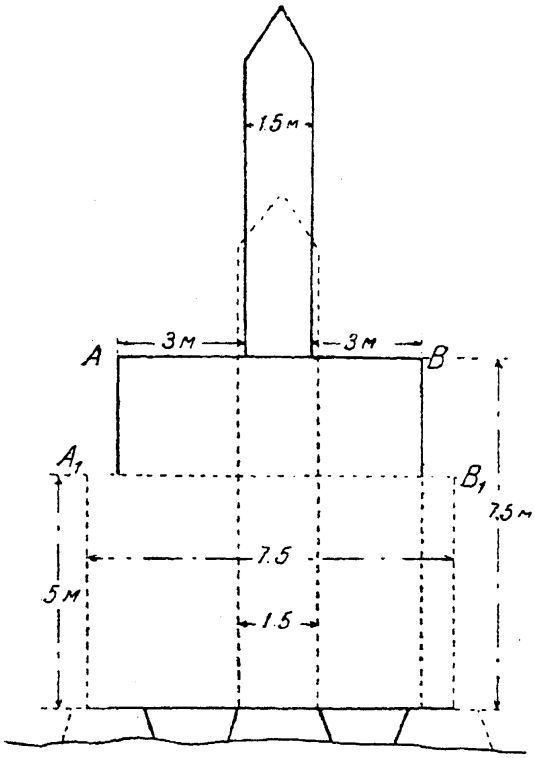
а) устройства створных знаков и чувствительности самих створов соответственно расстоянию от линии пробегов до створных знаков,

б) длины пробегов,

в) точности определения промежутка времени между моментами прохождения створов,

г) точности наблюдения числа оборотов.

§ 3. Линия пробега для больших кораблей должна располагаться в расстоянии не менее $1\frac{1}{2}$ миль, круглo 3000 м, от линии берега или линии малой глубины, если параллельно берегу идет риф или имеются отдельные банки, ибо иначе маневрирование корабля будет сопряжено с опасностью, а именно: если на повороте произойдет порча руля или рулевого привода, то корабль может выскочить на риф или на берег.



Фиг. 1.

Соответственно этому расстоянию и должны быть устроены береговые створные знаки.

Знаки должны иметь такие размеры и видимость, чтобы наблюдение можно было производить с достаточною точностью *простым* глазом, а не в бинокль, ибо при рассматривании знаков в бинокль пользование секундомером несколько стеснено и точность отметок времени практически не повышается.

Сетка в бинокле при наблюдении створов совершенно *бесполезна*, ибо знаки должны перекрывать друг друга.

Положим, для определенности суждений, что расстояние до ближнего знака 3000 м; размеры щита на знаке должны быть такие, чтобы щит представлялся под углом зрения около $0°10'$, т. е. около $\frac{1}{400}$, ярко выступая на фоне неба или берега. Средняя полоса на щите должна представляться под углом зрения около $1\frac{1'}{2}$, т. е. $\frac{1}{2000}$, резко выступая по цвету на фоне щита, поэтому размеры щитов должны быть такие, как показано на фиг. 1, на которой дальний щит изображен сплошной линией, а ближний — пунктиром.

Ближний щит должен проектироваться на дальнем при точном створении, как показано (фиг. 1), причем при одинаковых размерах ближний щит перекрывает дальний (можно делать и наоборот). Цвета средних полос и шпицев должны быть разные. Выбор цвета должен быть изучен с соблюдением масштаба расстояния до щитов и их размеров на модели сперва в $\frac{1}{100}$ натуры, а затем — в $\frac{1}{10}$ натуры.

Определив такими опытами размеры и цвет щитов и полос на них, надо определить наименьшее расстояние между щитами, чтобы створ обладал требуемой чувствительностью и давал бы возможность с достаточною точностью наблюдать моменты прохождения.[1]

При скорости корабля 10 узлов продолжительность пробега одной мили составляет 360 секунд.

По секундомеру с *двумя* стрелками (т. е. с независимой стрелкой для наблюдения моментов, не останавливая секундомера) эта продолжительность может быть определена с точностью до 1 секунды; значит относительная погрешность в скорости при длине пробега в 1 *милю* составит

	Относительная погрешность (%)	Абсолютная погрешность (узлы)
При 10 узлах	0.3	0.03
При 12 узлах	0.33	0.04
При 15 узлах	0.40	0.06
При 18 узлах	0.50	0.09

При скорости более 18 узлов надо делать пробеги в 2 мили, тогда

При 20 узлах	0.3	0.06
При 24 узлах	0.33	0.08
При 30 узлах	0.40	0.12
При 36 узлах	0.50	0.18

Так как при каждой скорости пробегов надо делать *три*, то погрешность в средней величине уменьшается против показанных приблизительно в $1\frac{1}{2}$ раза, что для *прогрессивных* испытаний более чем достаточно.

Пробеги бóльшей длины ведут лишь к напрасному увеличению продолжительности испытаний и, вместо кажущегося повышения точности результатов, вследствие неизбежной и неустранимой изменяемости ско-

[1] Здесь необходимо заметить, что большинство наблюдателей имеют так называемую *личную ошибку*, т. е. отмечают момент или раньше или позже совпадения; важно, чтобы эта ошибка была *постоянная*, тогда продолжительность пробега определится независимо от нее верно.

рости течения получается в действительности *понижение* точности искомой скорости по отношению к воде, составляющей цель испытаний.

§ 4. При пересечении кораблем створа наблюдателю представляются последовательные фазы, подобные тем, как при полном солнечном затмении, а именно (фиг. 2)

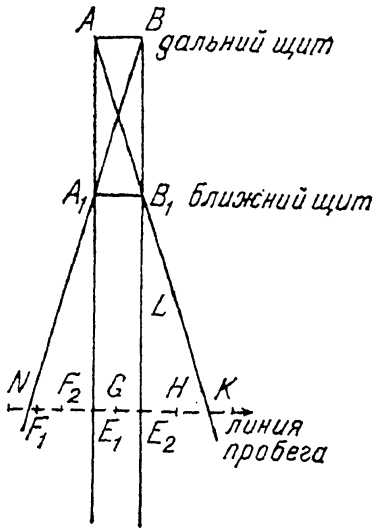
I фаза на участке NE_1

II фаза на участке E_1E_2

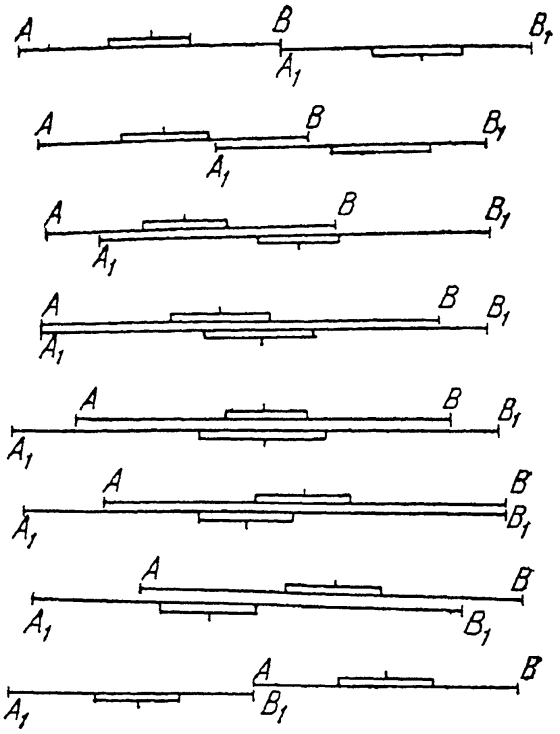
III фаза на участке E_2K.

Представим схематически, как наблюдателю представляются щиты на этих участках (фиг. 3).

1) Когда корабль придет в точку, то ближний щит A_1B_1 начнет перекрывать дальний щит AB в следующей последовательности:



Фиг. 2.



Фиг. 3.

I) В точке N — первое касание.

В точке F_1 — накрытие меньше половины справа.

В точке F_2 — накрытие больше половины справа.

II) В точке E_1 — начало полного накрытия.

В точке G — середина полного накрытия — пересечение створа (см. фиг. 1).

В точке E_2 — конец полного накрытия.

III) В точке H — третья фаза — накрытие слева.

В точке K — второе касание.

Точно заметить момент середины полного накрытия, т. е. когда наблюдатель в точке G, на ходу корабля практически *невозможно.*

Наблюдатель отмечает (и это хорошо) какой-либо момент полного накрытия, возможно близкий к середине полной фазы.

Достаточность этого явствует из следующей таблички продолжительности этой фазы

Скорость хода (узлы)	Продолжительность полной фазы (секунды)
10	1.5
12	1.25
15	1.00
18	0.83
20	0.75
24	0.63
30	0.50
36	0.42

Чувствительность створа состоит в том, чтобы продолжительность первой и третьей фазы была такова, чтобы наблюдатель имел возможность отличить эти фазы от полной и, будучи как бы к ее наступлению подготовленным, мог точнее отметить ее середину.

Пусть (фиг. 2) $\lambda = BB_1$ есть расстояние между щитами, $A_1E_1 = L$ — расстояние от ближнего щита до линии пробега и

$$AB = A_1B_1 = b$$
$$NE_1 = E_1K = c$$

Тогда, очевидно, из подобия треугольников NE_1A_1 и A_1AB имеем

$$c : b = L : \lambda$$

т. е.

$$c = b\frac{L}{\lambda}$$

Значит, для уменьшения c надо брать отношение $\lambda : L$, т. е. расстояние между щитами, как можно больше по сравнению с расстоянием от линии пробега до ближнего щита.

Однако практически не только брать λ больше L, но даже равным L не удается и неудобно — хорошая пропорция получается, взяв $\lambda = \frac{1}{3} L$, так что $c = 3b$, соответственно чему продолжительность первой и третьей фаз *втрое* больше продолжительности накрытия.

Искусственное продвижение модели одного щита перед другим с автоматическою отметкою момента точного совпадения дает полную возможность изучить достижимую точность отметок наблюдателем этих моментов, определить его личную ошибку, дать ему возможность упражняться, а главное, изучить рациональность выбора размеров и расположения щитов дорого стоящего устройства мерной мили.

Затруднений такое изучение не представляет, и я полагаю его весьма полезным при разработке проекта устройства мерной мили.

§ **5.** Для повышения точности наблюдения числа оборотов без сложного и быстро приходящего в расстройство контактного приспособления следует

поступить так: не считать, как обыкновенно делают, числа оборотов в минуту, а, следя по имеющемуся в машине счетчику оборотов, замечать по секундомеру (с двумя стрелками) *моменты* появления на счетчике двух последних цифр 00 (целые сотни оборотов), когда число оборотов меньше 200 в минуту, и чисел 000, 200, 400, 600, 800, когда число оборотов больше 200 в минуту. По этим моментам затем точно рассчитывается минутное число оборотов. Это наблюдение надо вести непрерывно в течение *всего* пробега от створа до створа, помечая тот промежуток, когда были сняты индикаторные диаграммы.

§ 6. Относительно определения мощности торзиометрами личного опыта не имею, достижимой точности не знаю, но сомневаюсь, чтобы можно было получить погрешность меньше $1\frac{1}{2}\%$, что будет, приблизительно, соответствовать и достижимой точности в 0.5% определения скорости.

Индикаторов с непрерывной записью едва ли имеется в наличии достаточное число комплектов, чтобы обслужить, например, двухвальную дизельную установку с шестицилиндровыми моторами.

К тому же обработка этой записи будет весьма продолжительна.

Точность обыкновенных индикаторов для больших механизмов с числом оборотов не более 200 вполне достаточна, надо только снимать при каждом пробеге не менее двух серий диаграмм.

Весьма быстроходные двигатели и турбинные механизмы требуют специальных приборов и методов для определения их мощности.

§ 7. Глубина воды на мерной миле должна определяться не в зависимости от углубления корабля, а в зависимости от *наибольшей скорости* хода тех кораблей, испытание которых на данной миле предполагается производить.[1]

Критическая глубина воды рассчитывается по формуле

$$h_0 = \frac{V^2}{g} \qquad (\text{Sic! } g \text{ а не } 2g)$$

где V скорость в метрах в секунду, таким образом получается

Скорость хода (узлы)	Критическая глубина (метры)
16	6.4
20	10
24	15
30	23
36	33

Глубину воды надо брать так, чтобы, приблизительно, было

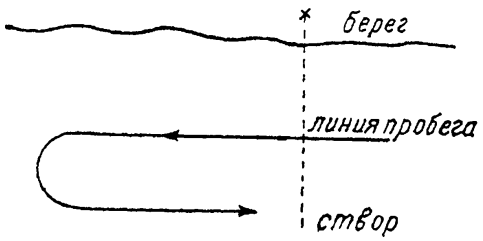
$$h_1 = 1.50\frac{V^2}{g} + H$$

---

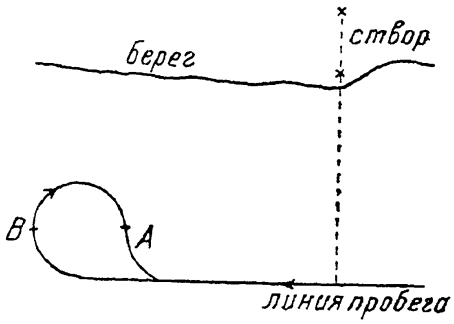
[1] См. статью „Влияние глубины моря на результаты испытаний миноносца «Быстрый»“, стр. 119.

где H — углубление корабля (скажем наибольшее 10 м), тогда для 36-узлового корабля надо глубину воды около 60 м.

§ **8.** Устройство створа по линии пробега обыкновенно недостижимо, к тому же практически бесполезно, ибо если бы курс составил даже с перпендикуляром к линии створов угол в 5°, то погрешность в длине пробегов составит всего 0.3%, погрешность же в 5° в курсе быть не может,



Фиг. 4.



Фиг. 5.

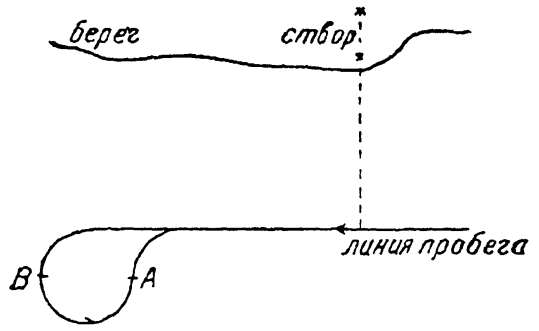
ибо, взяв при подходе к миле пеленг створа, определим поправку компаса.

Точность этого определения около 1—2°, а даже для 2° погрешность в длине составит

$$\frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{30}\right)^2 = \frac{1}{1800}, \text{ т. е., кругло, } 0.05\%$$

что совершенно ничтожно. Важно, чтобы рулевой хорошо правил и на румбе не рыскал.

§ **9.** Способы определения скорости попутного потока на ходу винтового корабля мне неизвестны, и едва ли таковые осуществимы, если только испытуемый корабль не буксируется другим вне его струи. Это требует довольно сложного устройства.



Фиг. 6.

Едва ли определение скорости попутного потока осуществимо без очень сложных приспособлений с несколькими электрическими лагами Форбса или Черникеева, установленными как на выстреле вне корабля, так и в разных местах на самом корабле, а главным образом, перед выходами или кронштейнами гребных валов, притом в разных расстояниях от корабля, чтобы охватить значительную часть площади диска винтов.

Мне думается, что это дело довольно безнадежное.

§ **10.** Таким образом, схема мерной мили должна быть примерно такова.

Глубина воды по линии пробега должна быть около 60 м = 30 морских сажен, *везде ровная.* На продолжении линии пробегов в обе стороны

мили на три должна быть везде чистая вода и тоже ровная глубина около 30 сажен, чтобы корабль, сделав пробег, мог пройти по крайней мере $1\frac{1}{2}$ мили, чтобы повернуть на обратный курс, а если число оборотов изменено на следующее, то надо отойти не менее 2 миль и после того сделать поворот; если оборотов до вступления „на милю“ выровнять не поспевают, то этот пробег не числить.

§ **11.** При производстве пробегов надо строго следить за тем, чтобы корабль совершил свои пробеги вдоль одной и той же линии, ибо в различных расстояниях от берега течение может быть различное, поэтому корабль должен приходить на обратный курс, описывая не полуциркуляцию (фиг. 4), а координат.

При этом координат надо *описывать, как показано на фиг. 5*, а не как на фиг. 6, ибо, если описывать координат, как показано на фиг. 6 то при проходе через точку A мгновенный курс корабля направлен *в берег*, и в этот момент необходимо переложить руль с борта на борт; рулевые приводы именно при перекладке испытывают наибольшее напряжение и могут испортиться или сдать, и корабль подвергается опасности выскочить на берег.

Когда же координат описывается, как показано на фиг. 5, то в момент перекладки руля в точке A корабль направлен *от берега*, и лишь в точке B на циркуляции его мгновенный курс направлен в берег, что гораздо менее опасно, нежели маневр, показанный на фиг. 6.

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ МОРЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МИНОНОСЦА „БЫСТРЫЙ“ [1]

В марте 1915 г. в Черном море производились приемные официальные испытания миноносца „Быстрый“, причем при мощности 26 000 л. с. миноносец развил скорость в 30 узлов, между тем при заводском испытании 1 февраля при мощности в 16 000 сил была развита скорость в 28.3 узла.

Официальное испытание производилось на Лукульской мерной миле, где глубина воды от 15 до 20 сажен, заводское — между Георгиевским монастырем и мысом Сарыч на глубине от 50 до 70 сажен.

Тогда же о рассмотрении этого вопроса мною была составлена приводимая ниже записка, в которой поясняется влияние глубины воды на результаты испытаний ходкости кораблей.

Эта записка оставалась мало кому известной, между тем рассматриваемый в ней вопрос имеет непосредственное практическое значение и связан с выбором места для мерной мили, поэтому эта записка и помещается ниже как прибавление к статье „О прогрессивных испытаниях кораблей“.

Из рассмотрения отчета об испытаниях миноносца „Быстрый“ видно, что это испытание производилось на Лукульской мерной миле близ Севастополя, причем миноносец ходил не по створу знака и купола Херсонесского собора, где глубина около 30—35 сажен, а ближе к берегу на глубинах 15—20 сажен, развивая при этом скорость около 30—31 узла, причем эта скорость была достигнута при полном напряжении горения и при мощности механизмов до 26 000 сил на валу.

Отсюда видно, что при производстве этого испытания не принято во внимание одно весьма важное обстоятельство, а именно: влияние глубины воды, проявляющееся в весьма сильной степени при скорости, близкой к „критической“ для рассматриваемой глубины.

Чтобы выяснить это влияние, я приведу сводку данных по этому вопросу, имеющихся в специальной литературе.

Еще в 1840-х годах Скот-Россель исследовал свойства движения так называемой „переносной“ или „единичной“ волны, появляющейся

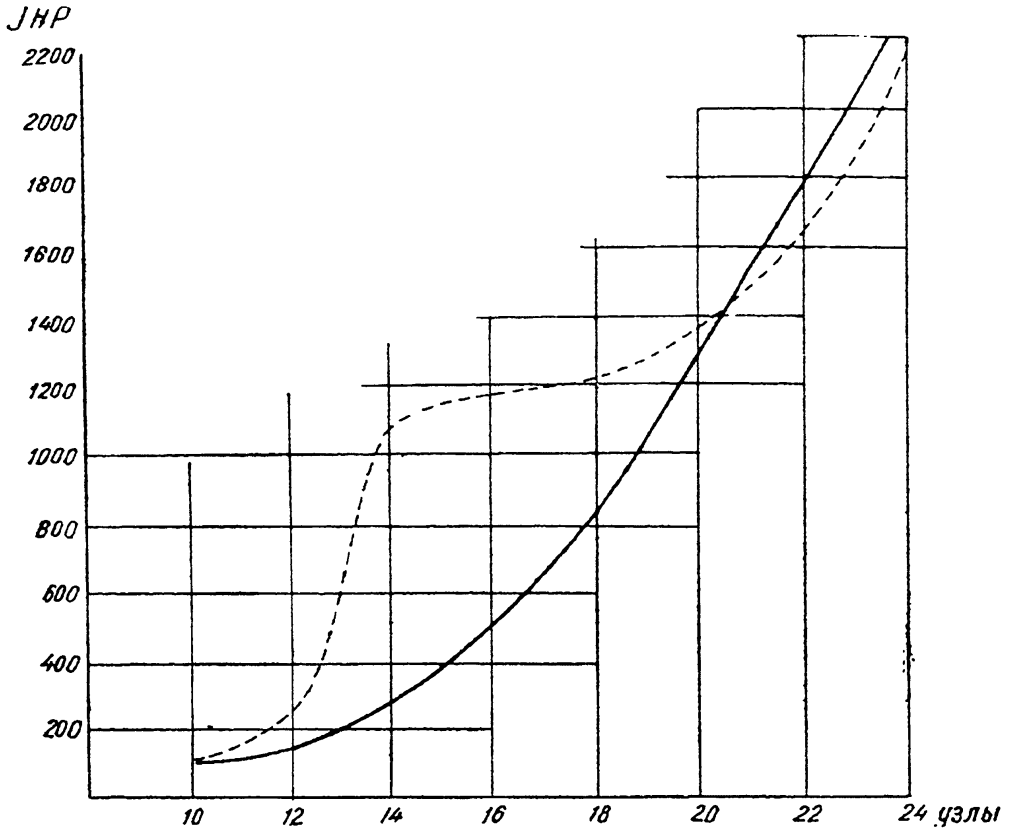
---

[1] Впервые напечатано в „Бюллетене НТК УВМС РККА“ (1931, № 5).

в канале постоянной глубины при некоторых определенных условиях. Скорость бега такой волны оказалась зависящей от глубины воды и выражающейся формулой

$$v = \sqrt{g(h+f)} \qquad (1)$$

где v — скорость бега волны, h — глубина воды, f — высота волны, g — ускорение силы тяжести. Очевидно, что когда высота волны f составляет



Фиг. 1. Диаграмма испытаний миноносца „Makrellen". $L = 145'\,6''$, $B = 15'\,6''$, $D = 132$ т.

Сплошная кривая изображает результаты испытаний на большой глубине воды (свыше 20 сажен), прерывистая — на малой $\left(2\frac{1}{2}\right.$ сажени$\left.\right)$.

небольшую долю глубины воды, то предыдущая формула обращается в такую

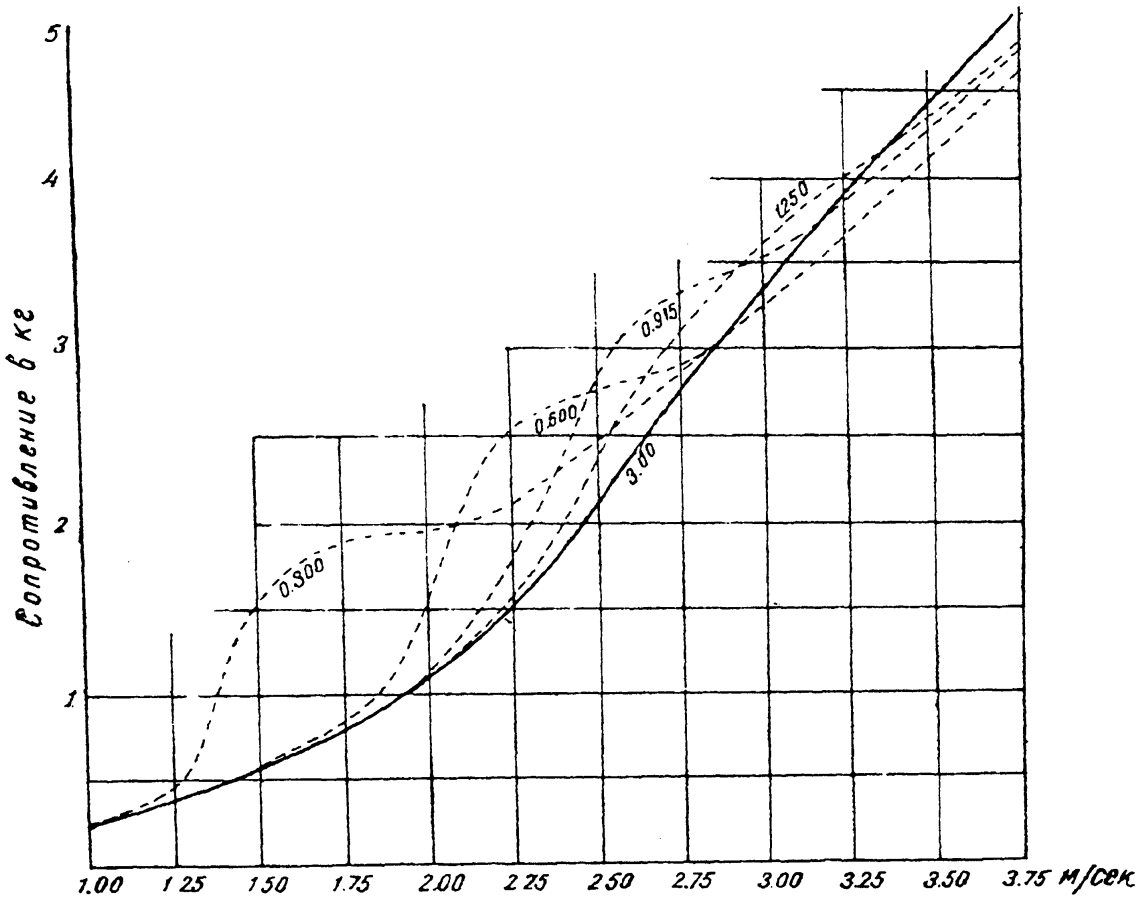
$$v = \sqrt{gh} \qquad (1')$$

Практическое влияние образования такой волны сказывалось в том, что при бечевной или конной тяге не удавалось сообщить идущему по каналу кораблю скорости бóльшей, нежели рассчитываемая по формуле.

Вновь этот вопрос был поднят в 1894 г. капитаном Расмунденом по поводу испытания датского миноносца „Makrellen".

Это испытание было произведено на большой глубине (свыше 20 сажен) и на малой в $2\frac{1}{2}$ сажени, т. е. около 15 футов. Результаты этих параллельных испытаний показаны на прилагаемой диаграмме (фиг. 1).

Из этой диаграммы видно, что, начиная со скорости $12\frac{1}{2}$ узлов (т. е. 21 фут в секунду) при повышении мощности машины с 300 до 1100 л. с., скорость возросла всего до 14 узлов (тогда как на глубокой воде при 1100 силах эта скорость составляла 19 узлов), затем при незначительном увеличении мощности скорость почти сразу возросла до 18 узлов и далее по мере возрастания мощности шло и плавное возрастание скорости. Как видно, наибольшее и притом громадное (вместо 280 сил 1080 сил)



Фиг. 2. Диаграмма испытаний модели миноносца водоизмещением 150 т. $L = 12.33'$, $B = 1.35'$, $H = 0.32'$, $D = 145.2$ англ. фунта.

Цифры у кривых обозначают глубины в метрах.

влияние глубины проявляется при 14 узлах, т. е. 24 фута в секунду.

По формуле (1), переписанной в таком виде: $h + f = \frac{v^2}{g}$, этой скорости соответствует

$$h + f = \frac{24^2}{32.2} = 18 \text{ футов}$$

а так как глубина воды составляла около 15 футов, то получается весьма правдоподобная (вероятно, несколько меньшая истинной) высота волны $f = 3$ фута.

Вместе с тем резкое повышение сопротивления начинается со скорости около 21 фута в секунду, почти в точности соответствующей началу образования „единичной“ волны, рассчитываемой по формуле (1′), ибо

$$\sqrt{32.2 \cdot 15} = 22 \text{ фута в секунду}$$

Довольно долгое время результаты испытания миноносца „Makrellen“ оставались как бы единичным фактом, пока в 1900 г. Рота, заведывавший опытовым бассейном в Специи, не произвел систематического исследования этого вопроса, испытав сопротивление моделей при разной глубине воды в бассейне.

Результаты испытаний, относящиеся к модели миноносца, показаны на приложенной диаграмме (фиг. 2).

Рота производил испытания модели при глубинах: 0.300, 0.600, 0.915, 1.250, 1.900 и 3.00 м.

На чертеже приведены первые четыре кривые наблюденных сопротивлений при указанных по оси абсцисс скоростях и последняя, соответствующая глубокой воде. Кривая для 1.900 м не перечерчена, ибо она весьма близка к кривой для 3.00 м и лишь затемняла бы чертеж.

Рота не указывает, как велика была высота волны, сопровождавшая движение модели при разных скоростях, но так как углубление модели составляло 0.33 фута, т. е. 0.10 м, то, приняв эту высоту в 0.35 м, мы не сделаем большой погрешности, в особенности для малых скоростей, где эта высота сказывается более сильно.

Рассчитаем тогда по формуле

$$v = \sqrt{g(h + f)}$$

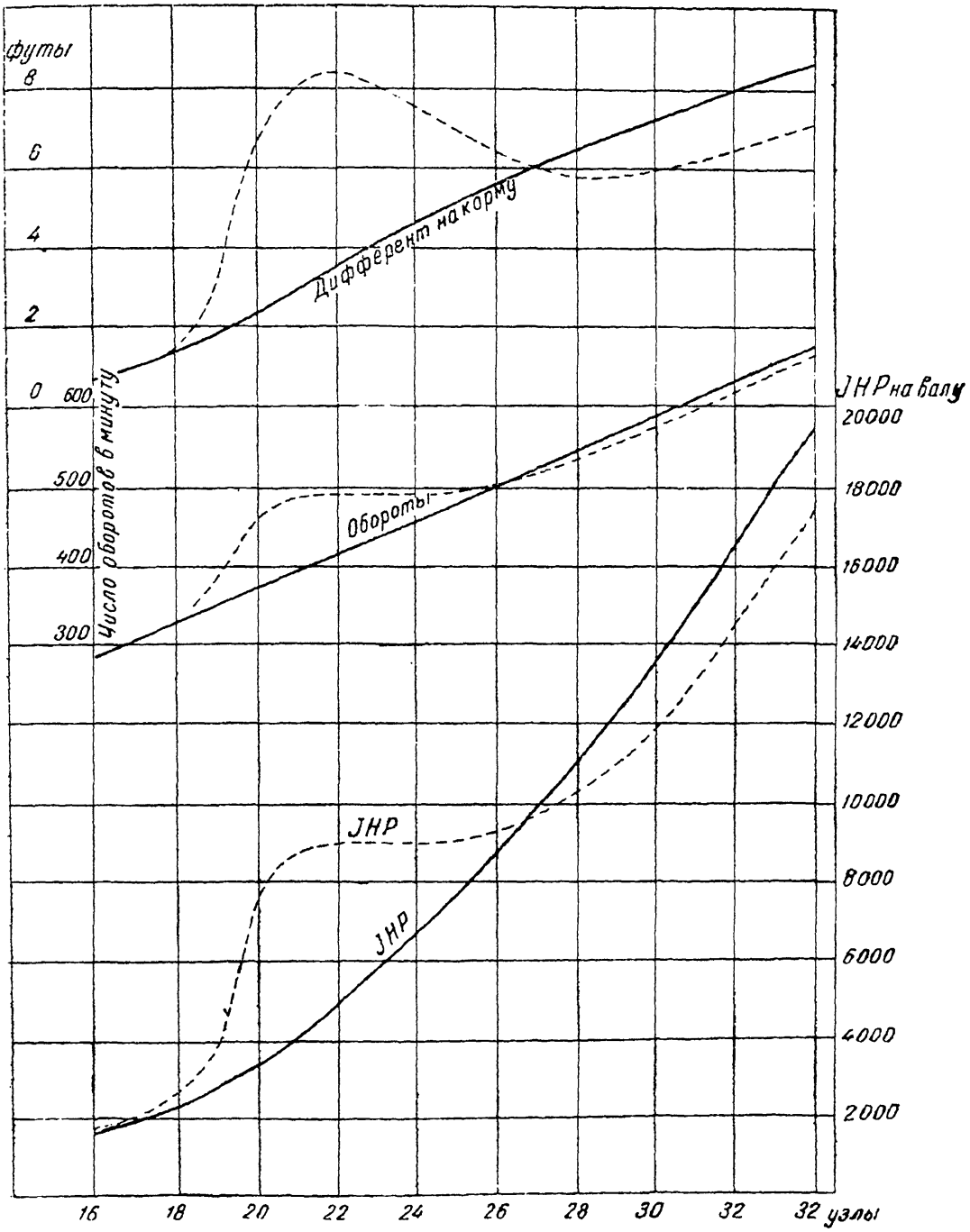
скорости, при которых можно ожидать наибольшей разницы в сопротивлениях. Ускорение силы тяжести g берем равным 9.81 м в секунду. Получаем табл. 1.

В предпоследней графе табл. 1 показана соответствующая наибольшей разности сопротивлений скорость v, снятая с чертежа.

Таблица 1

h (метры)	$v = \sqrt{g(h+f)}$ (м/сек.)	v (м/сек.)	$v = \sqrt{gh}$
0.300—0.350	1.85	1.75	1.71
0.600—0.650	2.54	2.25	2.42
0.915—0.965	3.07	2.70	2.99
1.250—1.300	3.57	—	—

Как видно, рассчитанная скорость несколько больше той, при которой наблюдается наибольшая разность, но она лежит все-таки в той области,



Фиг. 3. Диаграмма испытаний миноносца „Cossack". $L = 270'$, $B = 26'$, $H = 8'\,2''$, $D = 836$ т.

Прерывистая кривая изображает результаты испытаний на глубине 7.5 сажен = 45 футов, сплошная — на глубине 40 сажен = 240 футов.

где сопротивление на мелкой воде весьма значительно отличается от сопротивления на глубокой.

В 1905 г. Ярроу должен был сдавать построенные по заказу английского флота миноносцы около 600 т водоизмещения со скоростью 26 узлов.

Испытания сперва были произведены на мерной миле Марлин у устьев Темзы с глубиною воды 45 футов. Здесь миноносцы далеко не доразвили контрактной скорости, но когда испытания были повторены на глубокой воде близ Дувра, то миноносцы развили требуемый ход. Ярроу сделал об этом доклад в Английском обществе корабельных инженеров, вместе с тем Маррине в своем докладе, разбиравшемся совместно с докладом Ярроу, изложил те теоретические соображения, сущность которых приведена выше.

По настоянию Ярроу и других строителей миноносцев английское адмиралтейство в 1909 г. произвело параллельные испытания миноносца „Cossack“ на мерной миле Марлин с глубиной $7\frac{1}{2}$ сажен (45 футов) и на мерной миле Скермочли с глубиною 40 сажен.

Таблица 2

h (сажени, в скобках футы)	$v = \sqrt{gh} : 1.7$ (узлы)
15 (90)	31.6
16 (96)	32.7
17 (102)	33.7
18 (108)	34.7
19 (114)	35.6
20 (120)	36.6

Результаты этих испытаний были сообщены Обществу корабельных инженеров в 1909 г. Ф. Уоттом, бывшим тогда главным судостроителем английского флота. Сводка этих результатов показана на фиг. 3.

По формуле

$$v = \sqrt{gh}$$

глубине в 45 футов соответствует „критическая“ скорость 38 футов в секунду, т. е. 22 узла, которая, как видно, весьма близка к той, где разность сопротивлений на мелкой воде и на глубокой наибольшая.

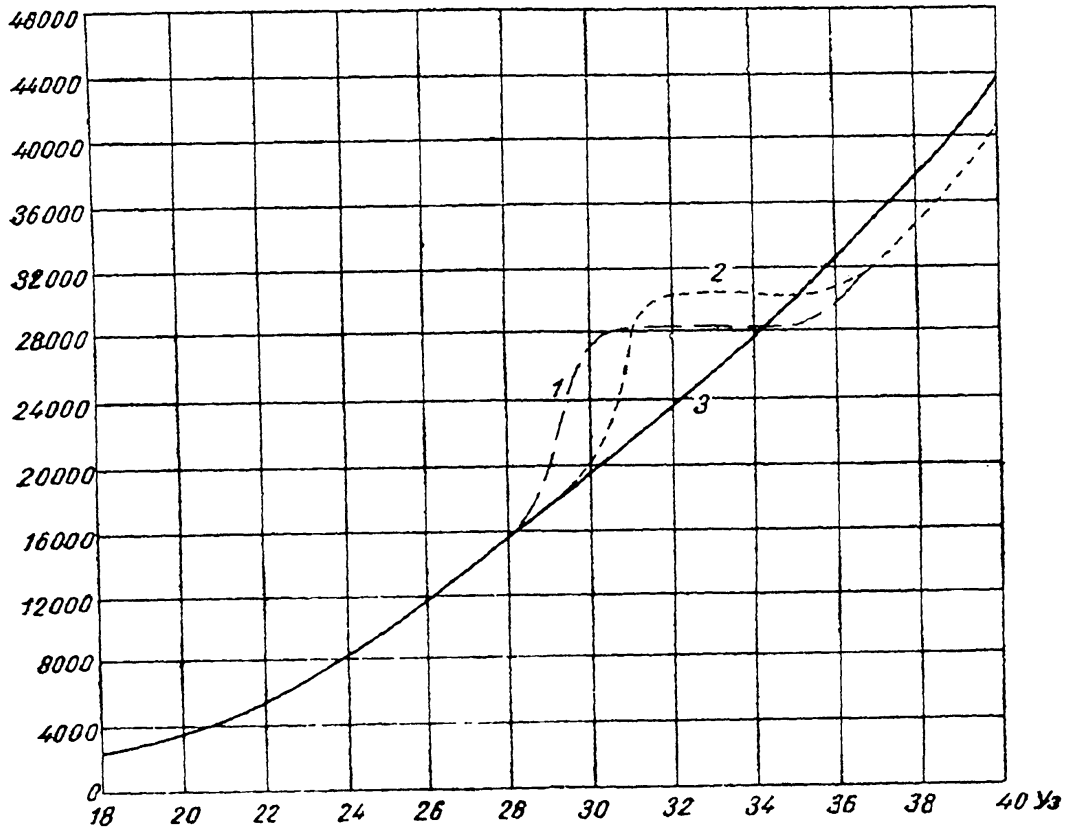
Диаграмма настолько ясна, увеличение сопротивления проявилось так резко, что не требуется никаких пояснений, но полезно обратить внимание, что при подходе к критической скорости увеличение числа оборотов почти не дает увеличения скорости и вместе с тем начинается резкое и быстрое увеличение дифферента.

Эти испытания вместе с приведенными ранее, можно сказать, окончательно устанавливают существование описанного явления с совершенно такою же степенью достоверности, как всякий физический закон; вместе с тем изложенные теоретические основания дают возможность его предвычислить с такою же степенью достоверности, как, например, предвычисляется солнечное или лунное затмение.

Обратимся же теперь к рассмотрению тех условий, в которых производилось испытание миноносца „Быстрый“. Прежде всего рассчитаем критические скорости для глубин от 15 до 20 сажен (90—120 футов). Получим табл. 2.

Отсюда видно, что глубина в 15—16 сажен является именно той, при которой разница сопротивления на глубокой и на мелкой воде проявляется при скорости около 31 узла наиболее сильно.

Взяв кривую, полученную для миноносца „Cossack“, и кривые, полученные для моделей, испытанных Рота, можно предположительно начертить кривую для индикаторной мощности, подобную этим, заметив, что протяжение „площадки“ составляет около 6 узлов. На фиг. 4, основываясь на диаграмме для большой глубины, полученной в бассейне, вычерчены



Фиг. 4. Кривые испытаний миноносца „Быстрый“.

1 — критическая скорость 31 узел (глубина 15 сажен); *2* — критическая скорость 32 узла (глубина 16 сажен); *3* — по опытам в бассейне (глубокая вода).

кривые для критических скоростей в 32 и 31 узел, соответствующих теоретическим глубинам в 16 и 15 сажен, а практически несколько большим.

Эта диаграмма с ясностью обнаруживает ненормальные условия испытаний: положим для примера, что миноносец находился на *ровной* 15-саженной глубине и захотел бы развить скорость в 30 узлов. До скорости приблизительно в 28 узлов все бы шло нормально, и эта скорость была бы достигнута при 16 тыс. сил и нормальном числе оборотов, но после этого, повышая мощность машин и число оборотов, заметили бы, что скорость повышается лишь весьма медленно, мощность механизмов довели бы до предельной, при которой на глубокой, тихой воде получается 34 узла, и все-таки 30 узлов не достигли бы.

Совершенно так же на *ровной* 16-саженной глубине, даже развив 30 тыс. сил, соответствующих 35-узловой скорости, не достигли бы 31 узла. Но само собой понятно, что идеально ровной глубины быть не может и даже на карте по линии, параллельной створу, показаны глубины от 20 до 14 и местами даже 13 сажен. Понятно, что при скорости, близкой к критической, при всяком, даже небольшом изменении глубины, резко меняется скорость и число оборотов, и работа механизмов становится совершенно ненормальной и самым вредным образом отражается на котлах, не говоря уже о том, что им придется для скорости 30—31 узел выносить такое же напряжение и доставлять такое же количество пара, как для 34-узловой, а, может быть, и бóльшей скорости на глубокой воде.

Необходимо еще иметь в виду, что миноносцу приходилось ходить не по линии вех и не по створу, а параллельно ему в расстоянии около 3 кабельтовых. Глубины между линией вех и берегом в расстоянии около $\frac{1}{2}$ мили от линии вех меняются при приближении или удалении от берега весьма чувствительно, и ясно, что это обстоятельство вносит еще один лишний элемент погрешности, отражающейся весьма значительно — стоит пройти от линии вех в $1\frac{1}{2}$—2 кабельтовых, где почти ровная 20-саженная глубина, и миноносец смог бы развить свои 30 узлов при 0.8 полной мощности, т. е. 20 тыс. сил. Стоит ему попасть на 14-саженную глубину — и скорость при этой мощности упадет до 26—27 узлов.

Отсюда ясно, что производство испытаний на 30 узлов при указанных условиях совершенно невозможно, и стремление развивать эту скорость в продолжение 10 часов равносильно стремлению развивать на глубокой воде скорость около 34 узлов, что может повести к окончательному надрыву котлов и выводу миноносца из строя.

Если 30-узловое испытание не может быть произведено на глубине не меньше 35—40 сажен, то, так как цель испытания состоит в том, чтобы убедиться, что котлы и механизмы способны долгое время выносить работу в 0.8 полной мощности, надо на глубине около 15 сажен развивать 20 тыс. сил, несмотря на то, какова при этом скорость, ибо испытания на скорость, по объясненной выше причине, на такой или близкой к ней глубине производимы быть не могут.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ФРУДА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТРЕНИЯ[1]

При определении сопротивления судна по испытанию его модели выделяется сопротивление от трения, которое рассчитывается по формуле

$$F = kSv^{1.825} \tag{1}$$

в которой S — смоченная поверхность модели или судна, v — скорость, k — некоторый коэффициент, величина которого зависит от длины модели или судна.

Фруд дает таблицу значений k для парафиновой модели и судна с окрашенной подводною частью. Эта таблица вошла и в известное сочинение Тэйлора, но ни Фруд, ни Тэйлор не указывают, каким образом получены числа этой таблицы.

В настоящей заметке, написанной около 25 лет тому назад, в бытность мою заведующим Опытовым бассейном, я показываю формулу, по которой, повидимому, произвел расчеты Фруд.

Применим формулу (1) к прямоугольной пластинке, длина которой l и поперечный обвод b, так что ее смоченная поверхность $S = bl$, и значит

$$F = k \cdot b \cdot l \cdot v^{1.825} \tag{1'}$$

С другой стороны, положив, что в расстоянии x от носа элементарная площадка $b \cdot dx$ испытывает сопротивление

$$v^{1.825} \cdot f(x) \cdot b \cdot dx$$

будем иметь

$$F = b \cdot v^{1.825} \int_0^l f(x)\, dx \tag{2}$$

следовательно,

$$k = \frac{1}{l} \int_0^l f(x)\, dx$$

---

[1] Впервые напечатано в „Бюллетене НТК УВМС РККА“ (1929, № 2).

или

$$kl = \int_0^i f(x)\,dx$$

отсюда следует

$$k + l \cdot \frac{dk}{dl} = f(l) \qquad (3)$$

Воспользовавшись таблицею Тэйлора, имеем (табл. 1):

Таблица 1

l	$10^5 \cdot k$	$2 \cdot 10^5 \frac{dk}{dl}$	$10^5 \cdot l \frac{dk}{dl}$	$10^5 \cdot f(l)$
9	1177	—36	—162	1015
10	1161	32	160	1001
11	1145	30	165	980
12	1131	21	162	969
15	1095	20	150	945
20	1055	14	140	915
25	1029	9	112	917
30	1010	7.2	108	902
40	981	4.4	88	893
50	963	3.1	77	886
70	940	1.7	59	880
100	923	0.8	42	880
150	909	0.4	30	879
200	902	0.24	24	878
300	892	0.16	24	868
400	886	—0.12	—24	862

Представляя функцию $f(l)$ графически, видно, что полученная кривая имеет характер гиперболы с ассимптотою, параллельной оси l, поэтому полагаем

$$10^5 \cdot f(l) = y$$

и берем уравнение вида

$$l(y - \alpha) = \beta \qquad (4)$$

причем α и β пока неизвестные постоянные.

Для определения этих постоянных воспользуемся предыдущею таблицею для значений от $l = 9$ до $l = 50$, так как лишь для досок такой длины были произведены испытания. Каждая строчка этой таблицы доставляет для определения α и β одно уравнение вида (4).

Группируя эти уравнения по способу наименьших квадратов, получим нормальные уравнения

$$n\beta + \alpha \sum l = \sum ly$$
$$\beta \sum l + \alpha \sum l^2 = \sum l^2 y$$

и для составления их табл. 2.

Таблица 2

l	y	l^2	ly	$l^2 y$
9	1015	81	9 135	82 200
10	1001	100	10 010	100 100
11	980	121	10 780	118 500
12	969	144	11 630	139 300
15	945	225	14 170	213 000
20	915	400	18 300	366 000
25	917	625	22 900	573 000
30	902	900	27 060	811 800
40	893	1600	35 720	1 428 800
50	886	2500	44 300	2 215 000
222	—	6696	204 000	6 047 700

Значит нормальные уравнения будут

$$10\beta + 222\ \alpha = 204000$$
$$222\beta + 6696\alpha = 6047700$$

или

$$\beta + 22.2\ \alpha = 20400$$
$$\beta + 30.13\alpha = 27250$$

Отсюда следует

$$\alpha = 864; \qquad \beta = 1230$$

Таким образом

$$l(y - 864) = 1230$$

причем

$$y = 10^5 \cdot f(l)$$

Чтобы вычислить коэффициенты k, надо иметь интеграл

$$\int_0^l f(x)\,dx = \int_0^c f(x)\,dx + \int_c^l f(x)\,dx$$

Для вычисления первого интеграла заметим, что непосредственным опытом определено значение k для $c=10$ футов, значит

$$\int_0^{10} f(x)\,dx = 10 \cdot k_{10} = 10 \cdot 0.01161 = 0.1161$$

Таким образом, будет

$$\int_0^{l} f(x)\,dx = \int_0^{10} f(x)\,dx + \int_{10}^{l} f(x)\,dx = 10 \cdot k_{10} + 0.00864\,(l-10) + 0.01230 \ln \frac{l}{10}$$

Заметив, что

$$k = \frac{1}{l} \cdot \int_0^{l} f(x)\,dx$$

имеем, введя обыкновенные логарифмы,

$$10^5 \cdot k = \frac{10^6 \cdot k_{10}}{l} + 864\left(1 - \frac{10}{l}\right) + \frac{2833}{l} \cdot \log \frac{l}{10} \qquad (5)$$

Результаты вычисления по этой формуле, которое мы приводим полностью, даны в табл. 3.

Таблица 3

l	$\frac{10^6 k_{10}}{l}$	$864\left(1-\frac{10}{l}\right)$	$\log \frac{l}{10}$	$\frac{2833}{l}$	$\frac{2833}{l} \cdot \log \frac{l}{10}$	$10^5 \cdot k$	$10^5 k$ по табл. Тэйлора
10	1161	0	0	283.3	0	1161	1161
11	1057	78	0.0414	257	11	1146	1145
12	968	144	0.0792	236	19	1131	1131
15	774	283	0.1761	189	33	1095	1095
20	581	432	0.3010	142	43	1056	1055
25	464	518	0.3979	113	45	1027	1029
30	387	576	0.4771	94.5	45	1007	1010
40	290	648	0.6021	70.8	43	981	981
50	232	691	0.6990	56.7	40	963	963
70	166	741	0.8451	40.5	34	941	940
100	116	777	1.0000	28.3	28	921	923
150	77	807	1.1761	18.9	22	906	909
200	58	821	1.3010	14.2	18	897	902
300	39	835	1.4771	11.3	17	891	892
400	29	842	1.6021	9.45	15	886	886

Согласие значений k, вычисленных по формуле (5), с показанными в таблице Тэйлора заставляет думать, что эта таблица, а значит, и фрудовская для „O_m“, вычислена по указанному способу, причем значения $f(l)$ Фруд брал по испытанию досок.

Заметим здесь же, что по самому способу вычисления коэффициентов k видно, что для тела с переменным обводом следовало бы вычислять сопротивление от трения по формуле

$$F = K \cdot v^{1.825}$$

причем

$$K = \int_0^l b f(x)\, dx$$

беря значения $f(x)$ из первой нашей таблицы, но, повидимому, самая метода испытания модели и перехода затем к судну не обладает такою точностью, чтобы стоило усложнять вычисление.

НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ОБРАБОТКЕ ПРОГРЕССИВНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУДОВ[1]

§ 1. Испытания судов на мерной миле часто обнаруживают существование течения, скорость которого изменяется, но в литературе нет достаточно обоснованных правил, каким образом учитывать эту изменяемость.

Обычное правило, рекомендуемое во всех справочниках и руководствах, таково: при каждом числе оборотов машины делать по меньшей мере три пробега, при каждом из которых замечать среднее минутное число оборотов и скорость хода по отношению к береговым знакам.

Пусть наблюденные числа оборотов n_1, n_2, n_3, соответствующие им скорости v_1, v_2, v_3, тогда истинная скорость (по отношению к воде) и соответствующее ей число оборотов получаются по формулам

$$v = \frac{v_1 + 2v_2 + v_3}{4}$$

$$n = \frac{n_1 + 2n_2 + n_3}{4}$$

§ 2. Нетрудно видеть, что это правило основано на следующем: обозначим неизвестные пока средние скорости течения во время пробегов через w_1, w_2, w_3, тогда, принимая при малом изменении числа оборотов аванс a постоянным, иными словами, считая, что при малых изменениях скорость судна по отношению к воде пропорциональна числу оборотов винта, будем иметь уравнения

$$v_1 = an_1 - w_1 \tag{1}$$

$$v_2 = an_2 + w_2 \tag{2}$$

$$v_3 = an_3 - w_3 \tag{3}$$

положив для примера, что при первом пробеге течение попутное; если бы течение оказалось встречным, то можно вида уравнений не изменять, а величина w_1 оказалась бы отрицательной.

---

[1] Впервые напечатано в „Бюллетене НТК УВМС РККА“ (1929, № 2).

Как видно, в этих *трех* уравнениях — *четыре* неизвестных: a, w_1, w_2, w_3, значит, необходимо еще одно уравнение.

Это четвертое уравнение берут *произвольно*

$$w_2 = \frac{w_1 + w_3}{2} \tag{4}$$

иначе

$$2w_2 = w_1 + w_3 \tag{4'}$$

тогда на основании уравнений (1), (2), (3) имеем

$$v_1 + 2v_2 + v_3 = a\,(n_1 + 2n_2 + n_3) \tag{5}$$

или, разделив обе части на 4 и полагая

$$v = \frac{v_1 + 2v_2 + v_3}{4}$$

$$n = \frac{n_1 + 2n_2 + n_3}{4}$$

будем иметь

$$v = a \cdot n \tag{6}$$

и, значит,

$$a = \frac{v}{n} \tag{7}$$

есть аванс, соответствующий скорости v и числу оборотов n.

На этом, обыкновенно, вывод и заканчивается.

Но само собою разумеется, что из уравнений (1), (2), (3) по формулам

$$\left.\begin{aligned} w_1 &= \frac{v}{n} n_1 - v_1 \\ w_2 &= -\frac{v}{n} n_2 + v_2 \\ w_3 &= \frac{v}{n} n_3 - v_3 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

найдутся и скорости течения.

§ 3. Чтобы дальнейшие выводы были яснее, возьмем пример испытаний, произведенных 17 ноября 1928 г. в Шербурге при приемке теплохода „Нефтесиндикат СССР“ (табл.1).

По этим данным для первой серии пробегов получаем

$$v = 9.61 \text{ узла}; \qquad n = 97.6 \text{ об/мин.}$$

$$a = 3.04 \text{ м}$$

и затем

$w_1 =$ 0.89 узла W, т. е. с востока на запад
$w_2 =$ 0.36 узла W, т. е. с востока на запад
$w_3 = -$0.17 узла O, т. е. с запада на восток

Таблица 1

Сводка непосредственно наблюденных величин

№ пробега и курс	Время	Продолжительность пробега	Полное число оборотов: левая машина	Полное число оборотов: правая машина	Среднее число оборотов	Среднее минутное число оборотов	Наблюденная скорость (узлы)	Наблюденное ВНР (среднее)
1 O	13 ч. 40 м.	14 м. 02 с.	1404	1400	1402	99.90	8.97	
2 W	14 20	12 55	1232	1228	1230	95.23	9.74	2147
3 O	14 45	12 35.5	1254	1258	1256	99.98	9.99	
4 W	15 25	12 13.5	1395	1383	1389	113.62	10.29	
5 O	16 00	9 34.5	1100	1093	1096.5	114.51	13.14	3320
6 W	16 30	13 52	1578	1567	1572.5	113.44	9.07	

Примечание. Длина пробега между створами равна 3883.6 м.

Совершенно так же вторая серия пробегов дает

$$v = 11.41 \text{ узла}; \qquad n = 114.0 \text{ об/мин.}$$

$$a = 3.09 \text{ м}$$

и скорости течения

$$w_4 = -1.08 \text{ узла O}$$
$$w_5 = -1.68 \text{ узла O}$$
$$w_6 = -2.28 \text{ узла O}$$

Нанося скорость течения на график и проводя через полученные точки согласную кривую, получим фиг. 1, показывающую изменяемость скорости течения в зависимости от времени.

§ 4. Полученный результат является, однако, сомнительным, ибо он противоречит имеющемуся для множества судов опыту, а именно, оказалось, что аванс 3.09 м при 114 оборотах *больше*, нежели аванс 3.04 м при 97.6. Обыкновенно аванс с увеличением числа оборотов *убывает*, а не *возрастает*.

Это противоречие объясняется тем, что взятое *произвольно* уравнение (4′)

$$2w_2 = w_1 + w_3$$

и аналогичное ему

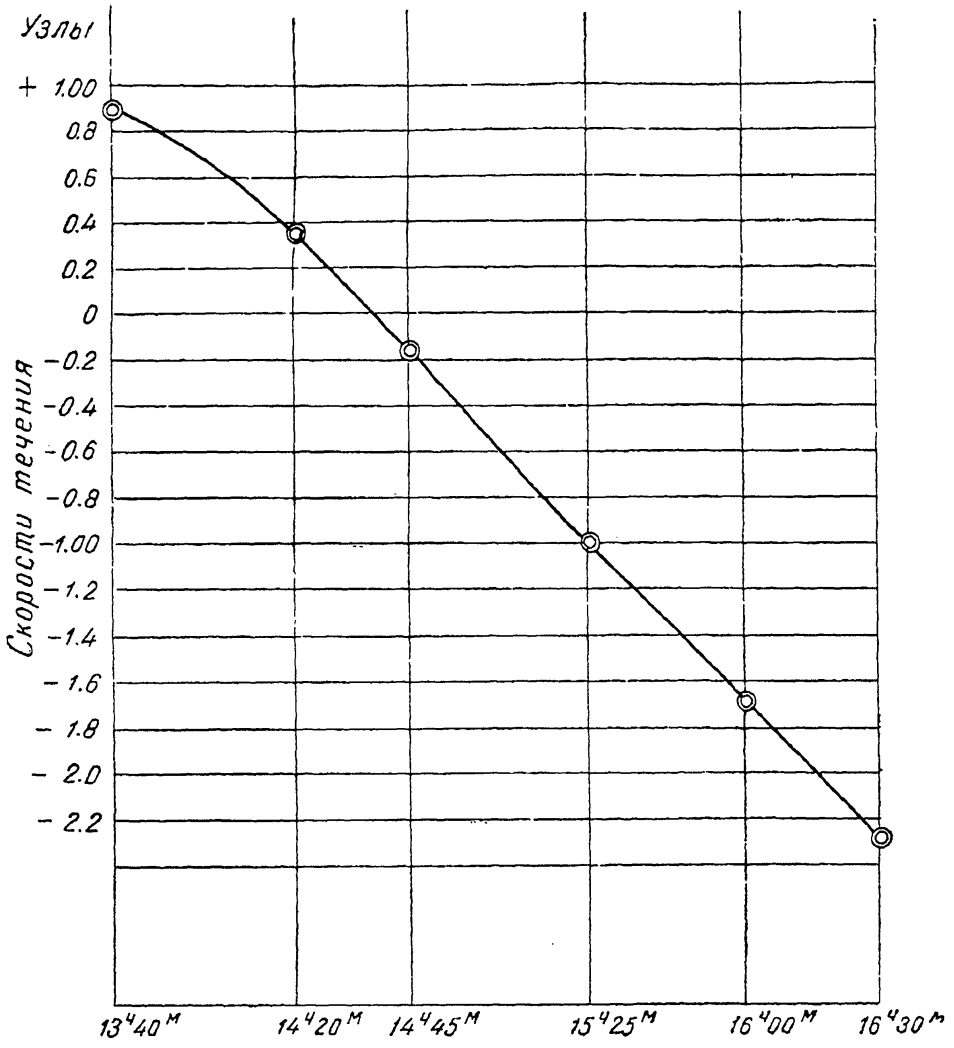
$$2w_5 = w_4 + w_6$$

в действительности места не имеют

Естественно вместо этого допущения принять для каждой группы пробегов *линейную зависимость скорости течения от времени*, т. е. положить

$$w = w_0 + k(t - t_0) \tag{9}$$

причем w_0, k, t_0—некоторые постоянные для каждой серии пробегов.



Фиг. 1.

Ясно, что w_0 есть скорость течения, соответствующая времени t_0.

Пусть t_1, t_2, t_3 суть времена начала или середины пробегов, возьмем

$$t_0 = \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{4} \tag{10}$$

ибо очевидно, что при составлении формулы (9) мы время можем считать от любого момента; тогда для первой серии пробегов будем попрежнему иметь уравнения

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= an_1 - w_1 = \frac{v}{n} n_1 - w_0 - k(t_1 - t_0) \\ v_2 &= an_2 + w_2 = \frac{v}{n} n_2 + w_0 + k(t_2 - t_0) \\ v_3 &= an_3 - w_3 = \frac{v}{n} n_3 - w_0 - k(t_3 - t_0) \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

из которых на основании (10) следует

$$v_1 + 2v_2 + v_3 = \frac{v}{n}(n_1 + 2n_2 + n_3) + k[2t_2 - (t_1 + t_3)]$$

поэтому, взяв

$$n = \frac{n_1 + 2n_2 + n_3}{4}$$

мы будем иметь

$$v = \frac{v_1 + 2v_2 + v_3}{4} - \frac{k}{4}[2t_2 - (t_1 + t_3)] \qquad (12)$$

т. е. $-\frac{k}{4}\left[2t_2 - (t_1 + t_3)\right]$ представляет ту поправку, которую надо присовокупить к величине $\frac{1}{4}(v_1 + 2v_2 + v_3)$, чтобы получить скорость хода, соответствующую числу оборотов n, при предположении о линейной зависимости скорости течения от времени.

Подставляя величину (12) в первые два из уравнения (11), мы найдем w_0 и k, а затем v, w_1, w_2, w_3 и аванс a.

Не развивая общих формул, поясним этот процесс на нашем примере.

Для первой серии пробегов имеем

$$\begin{array}{lll} t_1 = 13^{\text{ч.}}40^{\text{м.}}; & v_1 = 8.97; & n_1 = 99.90 \\ t_2 = 14^{\text{ч.}}20^{\text{м.}}; & v_2 = 9.74; & n_2 = 95.23 \\ t_3 = 14^{\text{ч.}}45^{\text{м.}}; & v_3 = 9.99; & n_3 = 99.98 \end{array}$$

Отсюда следует

$$t_0 = \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{4} = 14^{\text{ч.}}16.25^{\text{м.}}$$
$$v_0 = \frac{v_1 + 2v_2 + v_3}{4} = 9.61$$
$$n_0 = \frac{n_1 + 2n_2 + n_3}{4} = 97.6$$

Затем составляем

$$\begin{array}{l} t_1 - t_0 = -36.25 \text{ мин.} = -0.604 \text{ часа} \\ t_2 - t_0 = +\ 3.75 \text{ мин.} = +0.063 \text{ часа} \\ t_3 - t_0 = +28.75 \text{ мин.} = +0.479 \text{ часа} \end{array}$$

Значит

$$2t_2 - (t_1 + t_3) = 0^{\text{ч.}}15^{\text{м.}} = 0.25 \text{ часа}$$

следовательно,

$$v = v_0 - \frac{1}{4}k[2t_2 - (t_1 + t_3)] = 9.61 - \frac{1}{16}k = 9.61 - 0.063\ k$$

и первые два уравнения (11) будут

$$8.97 = (9.61 - 0.063\ k)\frac{99.90}{97.58} - w_0 + 0.604\ k$$

$$9.74 = (9.61 - 0.063\ k)\frac{95.23}{97.58} + w_0 + 0.063\ k$$

или, по упрощении,

$$-0.89 = -w_0 + 0.540\ k$$
$$0.36 = w_0 + 0.001\ k$$

откуда следует

$$k = -0.98; \qquad w_0 = 0.36$$

Следовательно, будет

$$w = 0.36 - 0.98\,(t - t_0)$$

и, значит,

$$\left.\begin{aligned} w_1 &= 0.95 \text{ узла} \\ w_2 &= 0.30 \text{ узла} \\ w_3 &= 0.11 \text{ узла} \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

и затем

$$\left.\begin{aligned} v &= 9.61 + 0.06 = 9.67 \\ n &= 97.6 \\ a_1 &= 3.06 \text{ м} \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Совершенно так же для второй серии пробегов имеем

$t_4 = 15^{ч}25^{м}$;	$v_4 = 10.29$ узла
$t_5 = 16^{ч}00^{м}$;	$v_5 = 13.14$ узла
$t_6 = 16^{ч}30^{м}$;	$v_6 = 9.07$ узла
$t'_0 = 15^{ч}58.75^{м}$;	$v_0' = 11.41$ узла

$n_4 = 113.62$;	$t_4 - t'_0 = -33.75$ мин. $= -0{,}562$ часа
$n_5 = 114.51$;	$t_5 - t'_0 = +1.25$ мин. $= +0{,}021$ часа
$n_6 = 113.40$;	$t_6 - t'_0 = +31.25$ мин. $= +0{,}521$ часа
$n'_0 = 114.01$;	$2t_5 - (t_4 + t_6) = \frac{1}{12}$ часа

Уравнения (11) будут

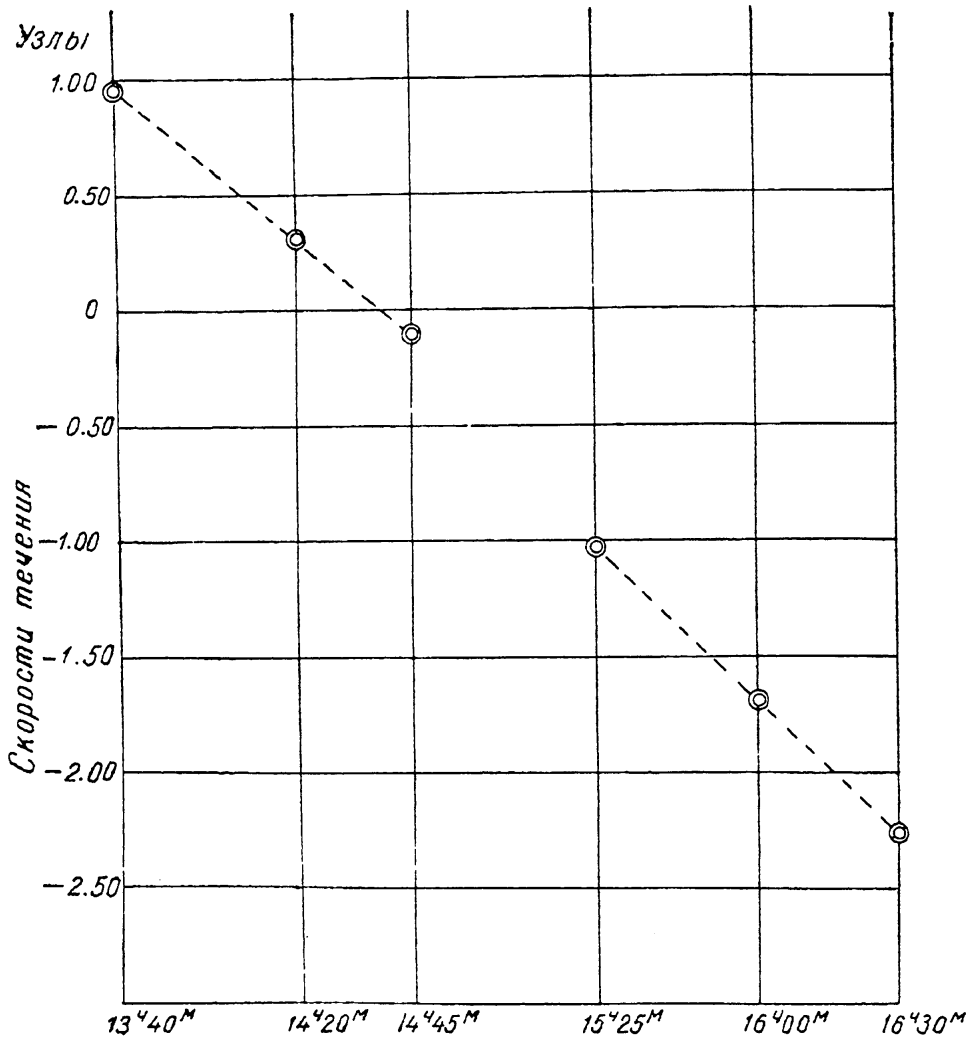
$$\left.\begin{aligned} v_4 &= \frac{vn_4}{n'_0} + w'_0 + k'(t_4 - t'_0) \\ v_5 &= \frac{vn_5}{n'_0} - w'_0 - k'(t_5 - t'_0) \\ v_6 &= \frac{vn_6}{n'_0} + w'_0 + k\,(t_6 - t'_0) \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Значит

$$v'_0 = v - \frac{k'}{4}[2t_5 - (t_4 + t_6)] \tag{16}$$

откуда

$$v = 11.41 + 0.021\ k'$$



Фиг. 2.

после чего имеем

$$10.29 = 11.37 + 0.021\ k' + w'_0 - 0.562\ k'$$
$$13.14 = 11.49 + 0.021\ k' - w'_0 - 0.021\ k'$$

иначе

$$-1.08 = w'_0 - 0.541\ k'$$
$$1.65 = -w'_0$$

Отсюда следует

$$w'_0 = -1.65 \text{ узла; } k' = -1.06$$
$$v = 11.41 - 0.02 = 11.38 \text{ узла}$$
$$w' = -1.65 - 1.06\,(t - t'_0)$$

следовательно,

$$w_4 = -1.06 \text{ узла O}$$
$$w_5 = -1.68 \text{ узла O}$$
$$w_6 = -2.20 \text{ узла O}$$

и аванс

$$a_2 = 3.08 \text{ м}$$

Графически скорости w показаны на фиг. 2.

Значения авансов показывают, что указанное выше противоречие *не устранено.* Причина этого в том, что скорость течения не есть линейная функция времени, как мы допустили; на самом деле относительно этой скорости мы можем с уверенностью лишь сказать, что это есть некоторая *непрерывная* функция времени $F(t)$, имеющая также и непрерывную производную, т. е. если откладывать по одной оси скорость течения w, а по другой время t, то получится некоторая „согласная" кривая, мы же вместо этой кривой взяли как бы две ее хорды.

§ 5. В. И. Афанасьев из рассмотрения результатов множества прогрессивных испытаний обнаружил, что между скоростью хода v и числом оборотов n имеет место зависимость

$$v = cn^{0.9}$$

причем c — некоторая постоянная для данного судна величина.

Из этой формулы следует, что

$$a = \frac{v}{n} = cn^{-0.1} \tag{17}$$

Таким образом, мы приходим к следующей задаче: имея приближенные места точек

$$(w_1, t_1);\ (w_2, t_2);\ (w_3, t_3);\ (w_4, t_4);\ (w_5, t_5);\ (w_6, t_6)$$

провести через точки, „близкие" к этим, „согласную" кривую так, чтобы уравнения

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= a_1 n_1 - w_1 \\ v_2 &= a_1 n_2 + w_2 \\ v_3 &= a_1 n_3 - w_3 \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

$$\left.\begin{aligned} v_4 &= a_2 n_4 + w_4 \\ v_5 &= a_2 n_5 - w_5 \\ v_6 &= a_2 n_6 + w_6 \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

были совместны, и авансы a_1 и a_2 были обратно пропорциональны степени 0.1 соответствующих чисел оборотов.

Понятно, что эта задача не есть чисто математическая, и при графическом ее решении остается некоторый произвол в смысле проведения „согласной" кривой через точки, „близкие к данным".

Но этот произвол в значительной мере ограничивается, если поступать следующим образом.

Отношение авансов a_1 и a_2 для первой и второй серии пробегов по формуле Афанасьева должно быть

$$\frac{a_2}{a_1} = \left(\frac{97.6}{114.0}\right)^{0.1}$$

из которой следует

$$\log a_2 - \log a_1 = -0.00675$$

в нашем же случае получилось, что

$$\log a_2 - \log a_1 = 0.00315$$

поэтому, если обозначить через δ_1 поправку, которую надо придать к $\log a_1$ и через δ_2 поправку, которую надо вычесть из $\log a_2$, чтобы получить величины авансов, удовлетворяющих формуле Афанасьева, то должно быть

$$\delta_1 + \delta_2 = 0.00990$$

Чтобы найти δ_1 и δ_2 в отдельности, надо воспользоваться тем, что $F(t)$ — функция, представляющая зависимость скорости течения от времени, должна представляться графически „согласною“ кривою.

Найдем сперва предельные авансы или скорости, удовлетворяющие формуле Афанасьева; мы их получим, беря комбинации

$$1)\ \delta_1 = 0.00990, \qquad \delta_2 = 0$$
$$2)\ \delta_1 = 0, \qquad \delta_2 = 0.00990$$

В первом случае будет

$$\log v_1 = 0.98543 + 0.00990 = 0.99533$$
$$v_1 = 9.89, \quad v_2 = 11.38$$

во втором

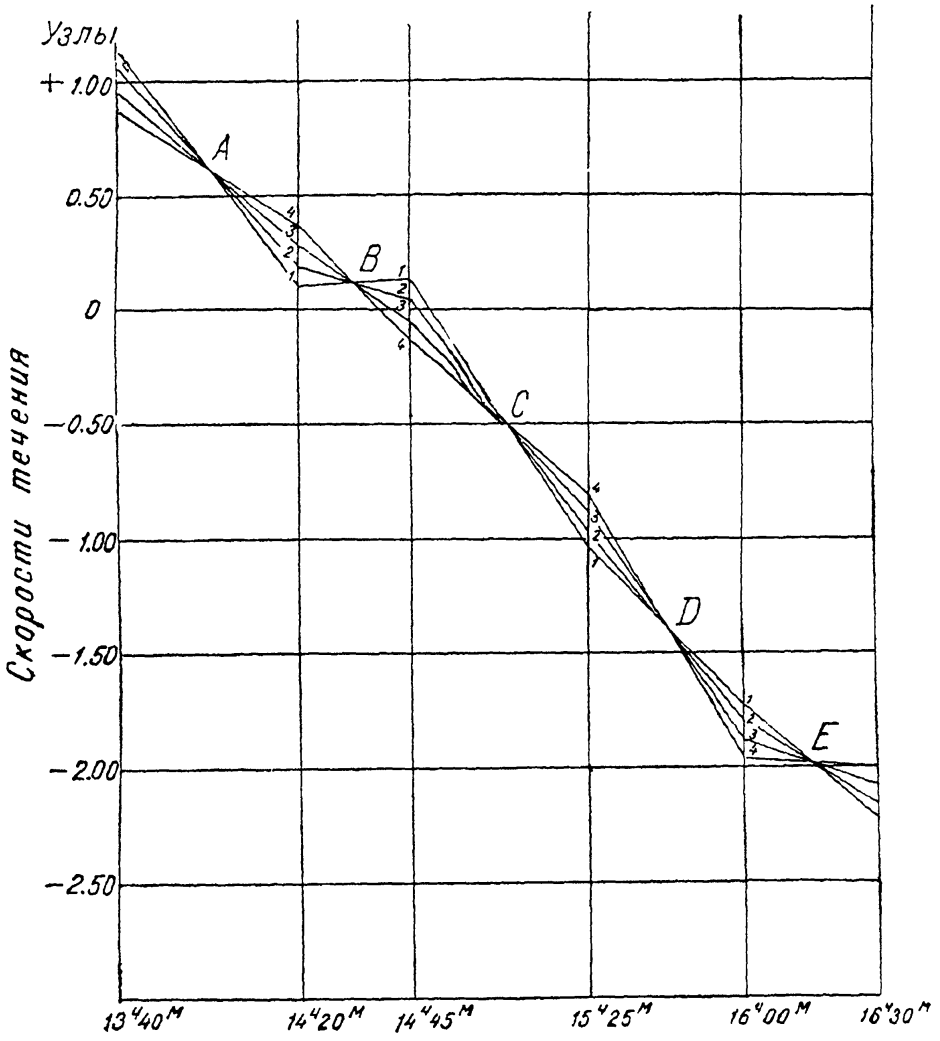
$$\log v_2 = 1.05614 - 0.00990 = 1.04624$$
$$v_2 = 11.12, \quad v_1 = 9.67$$

т. е. разность $v_2 - v_1$ составляет в первом случае 1.49, во втором 1.45 узла. Возьмем среднее 1.47, тогда составляем табл. 2.

Таблица 2

Предположение	v_1	a_1 (узлы)	v_2	a_2 (узлы)
1	9.89	0.10135	11.88	0.09982
2	9.80	0.10043	11.27	0.09912
3	9.70	0.09940	11.17	0.09824
4	9.61	0.09848	11.08	0.09753

Соответственно полученным авансам в указанных предположениях, на основании наблюденных скоростей и чисел оборотов, составляем следующую табл. 3.



Фиг. 3.

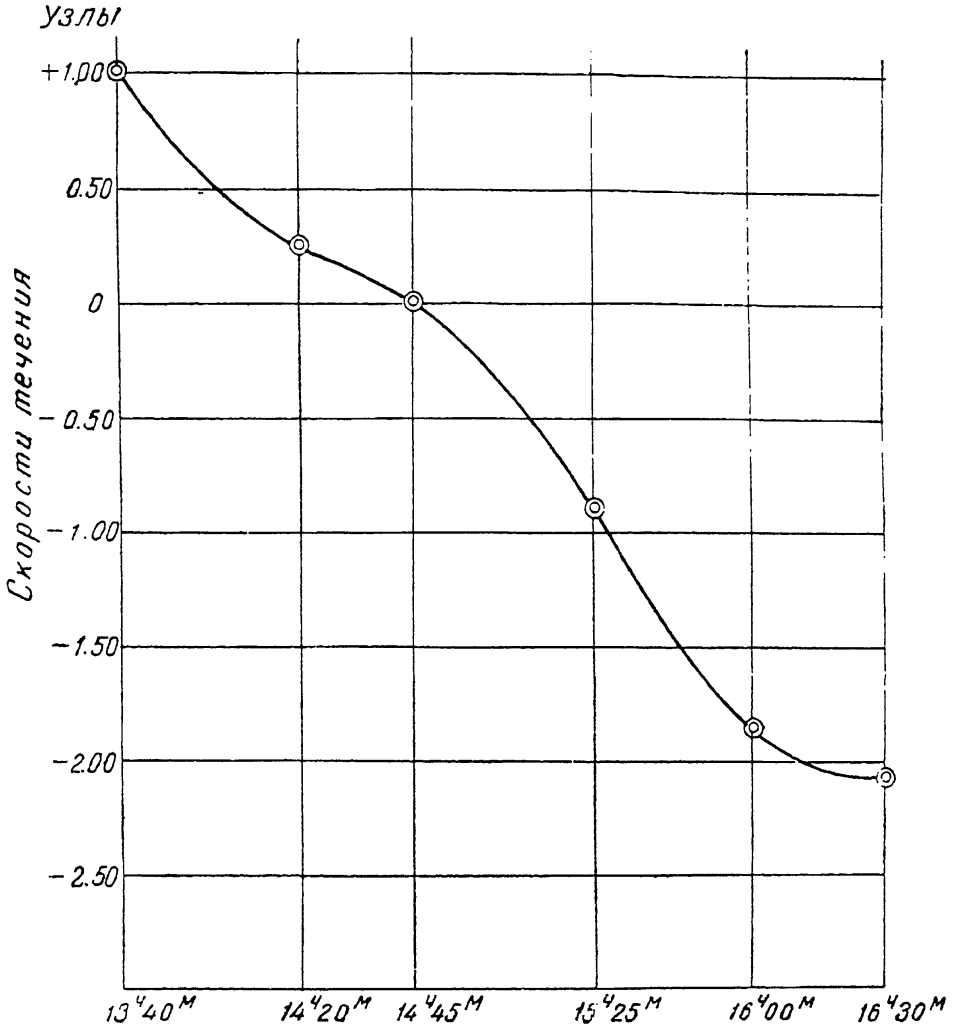
Нанося скорости течения на график, получим при каждой абсциссе по четыре точки, помеченные цифрами *1*, *2*, *3*, *4* (см. фиг. 3), причем

Таблица 3

Наблюден. скорость	Предполож. 1		Предполож. 2		Предполож. 3		Предполож. 4	
	an	*w*	*an*	*w*	*an*	*w*	*an*	*w*
8.97	10.11	1.14	10.03	1.06	9.93	0.96	9.84	0.87
9.74	9.64	0.10	9.56	0.18	9.46	0.28	9.37	0.37
9.99	10.12	0.13	10.04	0.05	9.94	—0.05	9.85	—0.14
10.29	11.32	—1.06	11.26	—0.97	11.17	—0.88	11.09	—0.80
13.14	11.41	—1.63	11.35	—1.79	11.26	—1.88	11.18	—1.96
9.07	11.30	—2.23	11.24	—2.17	11.15	—2.08	11.07	—2.00

эти точки на смежных ординатах располагаются в *обратном* порядке. Это не есть случайность, а в этом и заключается сущность нашего приема.

Соединяя точки, помеченные одинакозыми цифрами на смежных ординатах прямыми линиями, мы получим пучок ломаных, пересекающихся



Фиг. 4.

в фокальных точках *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, причем эти точки *постоянные* независимо от сделанных предположений.

Вместе с тем видно, что расположение этих точек таково, что через них легко провести согласную кривую; кроме того легко заметить, что ломаная III, т. е. проходящая через точки *3*, располагается наиболее близко к этой кривой, поэтому выносим на отдельный график точки *3* и проводим согласную кривую по возможности близко к этим точкам (фиг. 4). Эта кривая и представит искомую зависимость скорости течения от времени.[1]

Построив эту кривую, снимаем с нее скорости течения, соответствующие временам пробегов, вписываем их в столбец IV табл. 4 и сообразно

[1] Изменение скорости приливных течений в Ламанше происходит так, что на главную синусоиду с периодом 12 часов накладываются члены более короткого периода.

Таблица 4

Сводная таблица результатов

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
№ пробега и курс	Время	Наблюденн. скорость (узлы)	Скорость течения (узлы)	Истинная скорость хода (узлы)	Число оборотов	Среднее число оборотов	Средняя скорость (узлы)	ВНР
1 O	13ч. 40м.	8.97	+1.02	9.99	99.90			
2 W	14 20	9.74	+0.24	9.50	95.23	97.585	9.75	2147
3 O	14 45	9.99	+0.01	10.00	99.98			
4 W	15 25	10.29	—0.88	11.17	113.62			
5 O	16 00	13.14	—1.86	11.28	114.51	114.01	11.22	3320
6 W	16 30	9.07	—2.08	11.15	113.40			

с курсами присовокупляем к наблюденным скоростям; это и будут показанные в столбце V истинные скорости хода, после чего сводная таблица результатов испытания и будет заполнена.

Соответствующие скоростям 9.75 и 11.22 авансы суть

$$a_1 = \frac{9.75}{97.6} \cdot \frac{1852}{60} = 3.08 \text{ м}$$

$$a_2 = \frac{11.22}{114.0} \cdot \frac{1852}{60} = 3.04 \text{ м}$$

§ 6. По обычному приему получились скорости 9.61 и 11.41 узла, тогда как исправленные оказались 9.75 и 11.25 узла — разница незначительная, но сущность дела в том, что в первых числах заключается явное противоречие, и пока анализ не произведен и течение должным образом не учтено, нельзя судить о возможной величине погрешности.

Может показаться, что обработка наблюдений по изложенному способу сложна, но надо иметь в виду, что в этой записке изложена подробно не только самая обработка, но и *теория*, служащая основанием этого способа, ввиду того, что имеющееся в литературе об обработке наблюдений на мерной миле не может считаться удовлетворительным.

Само собою понятно, как следует поступать при бо́льшем числе серий; заметим, что тогда из самых наблюдений получается и зависимость аванса от числа оборотов.

Изложенный способ практикуется мною с 1900 г., излагался мною на лекциях в Морской академии, но опубликован не был и мало известен.

О ВЫЧИСЛЕНИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРЕНИЯ КОРАБЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ХОДА[1]

§ 1. Положим, что корабль идет на тихой воде, причем машина делает n_1 оборотов, и скорость корабля равна v_1; затем внезапно изменяют число оборотов на n_2, которому соответствует при установившемся движении скорость v_2 и, действуя на регистр, удерживают это число оборотов постоянным. Требуется определить ускорение корабля за время неустановившегося его движения.

При установившемся режиме можно приближенно считать, что скорость хода корабля пропорциональна минутному или секундному числу оборотов, так что

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= hn_1 \\ v_2 &= hn_2 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

Упорное же давление P пропорционально квадрату скорости, так что

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= kn_1^2 \\ P_2 &= kn_2^2 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Но при неустановившемся движении ни соотношения (1), ни соотношения (2) не имеют места, и упорное давление от начальной своей величины P_1 переходит к своему окончательному значению P_2 в некоторой зависимости от мгновенного значения скорости v, так что его величина

$$P = F(v) \tag{3}$$

причем вид функции мало исследован.

Простейшие предположения, которые здесь можно сделать, таковы

I $$P = P_2 \tag{4}$$

II $$P = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{v_2 - v_1}(v - v_1) \tag{5}$$

---

[1] Публикуется впервые.

Сопротивление же воды можно для простоты принять пропорциональным квадрату скорости, так что

$$R = kv^2 \tag{6}$$

Так как при установившейся скорости

$$R_1 = P_1; \quad R_2 = P_2 \tag{7}$$

то коэффициент k определится из любого равенства (8)

$$P_1 = kv_1^2; \quad P_2 = kv_2^2$$

Эти равенства обыкновенно между собою несовместимы, поэтому можно брать так называемое *взвешенное среднее*, т. е. принимать

$$k = \frac{P_1 v_1 + P_2 v_2}{v_1^3 + v_2^3} \tag{9}$$

§ 2. Согласно предположению I мы получаем

$$MW = P_2 - kv^2$$

т. е.

$$W = \frac{P_2}{M} - \frac{k}{M} \cdot v^2 \tag{10}$$

причем при $v = v_2$ будет

$$W = 0$$

при $v = 0$

$$W_0 = \frac{P_2}{M}$$

при $v = v_1$

$$W_1 = \frac{P_2 - P_1}{M}$$

Таким образом графически уравнение (10) представится параболой.

Мгновенное положение равновесия маятника определяется равенством

$$\theta = \frac{W}{g} \tag{11}$$

если углы выражать в числовой мере; если же углы выражать в минутах дуги, ускорения W и g — в м/сек², то будет

$$\theta = 3438 \frac{W}{9.8} = 350\ W \tag{11'}$$

Лишь маятник, период которого весьма мал по сравнению с продолжительностью нарастания абсолютной величины ускорения, занимает во всякий момент положение своего мгновенного равновесия; в других же случаях показание, иначе, угол наклона маятника, не равен мгновенному своему значению при равновесии; в таком случае надо для расчета показаний маятника обратиться к уравнению движения его, которое будет

$$I\theta'' + N\theta' + mgl \sin\theta - mWl\cos\theta = 0$$

где I — момент инерции маятника, m — его масса, ml — статический момент относительно точки подвеса. Так как угол θ весьма малый, то можно брать

$$\sin\theta = \theta; \qquad \cos\theta = 1$$

и, положив

$$\frac{mgl}{I} = n^2$$

получим

$$\theta'' + 2\mu\theta' + n^2\theta = \frac{n^2}{g} W \tag{12}$$

Для интегрирования этого уравнения надо сперва выразить W в функции от времени t, а для этого надо интегрировать уравнение (10)

$$M\frac{dv}{dt} = P_2 - kv^2 = k(v_2^2 - v^2)$$

иначе

$$\frac{dv}{v_2^2 - v^2} = \frac{k}{M}dt = \frac{1}{2v_2}\left(\frac{1}{v_2 - v} + \frac{1}{v_2 + v}\right)dv$$

или, положив

$$\frac{2kv_2}{M} = \frac{2P_2}{Mv_2} = a$$

получим

$$at + C = \log\frac{v_2 + v}{v_2 - v}$$

$$C = \log\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}$$

отсюда

$$at = \log\frac{v_2 + v}{v_2 - v} - \log\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}$$

следовательно,

$$\frac{v_2 + v}{v_2 - v} = \frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}e^{at} = \frac{e^{at}}{b}$$

где

$$b = \frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}$$

Отсюда следует

$$\frac{v}{v_2} = \frac{e^{at} - b}{e^{at} + b}$$

или

$$v = v_2\frac{e^{at} - b}{e^{at} + b}$$

и

$$W = 2ab\,v_2\frac{e^{at}}{(e^{at} + b)^2}$$

Если колебания маятника весьма медленные, то член θ'' может быть по своей малости отброшен, тогда уравнение (12) можно писать в виде

$$2\mu\theta' + n^2\theta = \frac{n^2}{g}W = \frac{n^2}{g}f(t)$$

или, положив

$$\frac{n^2}{2\mu} = c$$

$$\theta' + c\theta = \frac{c}{g} f(t)$$

Из этого уравнения имеем

$$(e^{ct}\theta)' = \frac{c}{g} e^{ct} f(t)$$

а так как при $t=0$ должно быть $\theta=0$, то будет

$$e^{ct}\theta = \frac{c}{g}\int_0^t e^{c\xi} f(\xi)\, d\xi = \frac{1}{g}[e^{c\xi} f(\xi)]_0^t - \frac{1}{g}\int_0^t e^{c\xi} f'(\xi)\, d\xi$$

$$\theta = \frac{1}{g}[f(t) - e^{-ct} f(0)] - \frac{1}{g} e^{-ct}\int_0^t e^{c\xi} f'(\xi)\, d\xi \qquad (13)$$

О величине c можно судить по погашению свободных колебаний маятника, придав ему начальное отклонение $\theta = \theta_0$.

Тогда уравнение движения будет

$$\theta' + c\theta = 0$$

при начальном условии

$$t=0; \qquad \theta = \theta_0$$

Отсюда

$$\theta = \theta_0 e^{-ct}$$

и, замечая последовательные значения t и θ, найдем c.

Вычислив несколько значений $f'(\xi)e^{c\xi}$, можно иметь приближенное суждение о величине количества

$$\frac{1}{g}\, e^{-ct}\int_0^t e^{c\xi} f'(\xi)\, d\xi$$

и если оно окажется малым по сравнению с первым членом формулы (13), то может быть отброшено, и тогда будет

$$\theta = \frac{1}{g}[f(t) - e^{-ct} f(0)]$$

§ 3. Все формулы § 1 выведены в предположении I, т. е. что все время $P = P_2$. Если взять предположение II:

$$P = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{v_2 - v_1}(v - v_1)$$

то уравнение движения будет

$$M\frac{dv}{dt} = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{v_2 - v_1}(v - v_1) - kv^2$$

т. е. вида

$$\frac{dv}{a + bv + cv^2} = dt$$

Это уравнение интегрируется в конечном виде в логарифмах, после чего вопрос решается подобно предыдущему.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ О БУКСИРОВКЕ СУДОВ[1]

В конце 1924 г., в бытность мою в заграничной командировке, мне было предложено Л. Б. Красиным составить соображения о буксировке больших и тяжелых кораблей открытым морем, а может быть, и океаном.

Было известно, что мощными буксирами некоторые фирмы перевели док 15 тыс. т подъемной силы из Голландии на Яву; также пароход в 20 тыс. т, поврежденный пожаром в Австралии, был приведен для исправления в Голландию и притом кругом мыса Доброй Надежды; наконец, в конце мировой войны один линкор США с поврежденными механизмами был отбуксирован от берегов Англии в США другим линкором, но я не мог найти подробного технического описания того, как эти буксировки производились.

Относительно линкора было мне известно, что вели его на двух стальных 9-дюймовых буксирах, пропущенных через клюзы и закрепленных за основание носовой башни; длина буксиров была 2700 футов.

При буксировке дока и парохода тоже пользовались 9-дюймовым стальным перлинем, причем морской буксирный пароход имел мощную сдающую лебедку.

Ввиду отсутствия указаний в литературе, я и произвел тогда же теоретическое исследование условий буксировки на взволнованном море *одного большого* корабля, скажем линкора, другим, также большим, как это имело место для линкора „Connectiqute".

Цель настоящей заметки представить ряд соображений, относящихся к буксировке судов, чтобы, на основании этих соображений, сделать по возможности обоснованный выбор потребной длины и толщины буксиров и отдать себе отчет о возникающих в них при разных условиях напряжениях.

1. Основные данные о тросах и цепях

Фирма, являющаяся поставщиком Английского адмиралтейства, дает об изготовляемых ею буксирах следующие данные.

---

[1] Публикуется впервые.

Специально гибкие проволочные тросы, изготовляемые из тигельной стали, сопротивлением на разрыв 95—105 т на кв. дюйм, 6-прядные по 37 проволок в пряди

Окружность (дюймы)	Вес одной 6-футовой сажени (англ. фунты)	Гарантированное разрывающее усилие (тонны)	Длина бухты (метры)	Цена за тонну (фунты стерлингов)
9	79.92	251.3	600	53.15
8	63.12	198.2	600	51.10
7	47.94	151.3	600	49.15
5	21.54	78.6	600	52.05
4	15.78	50.3	400	56.15

Эта таблица с достаточною точностью воспроизводится следующими формулами

$$p = 0.987\, c^2 \qquad (1)$$

$$R = 3.1\, c^2 \qquad (2)$$

причем p означает вес одной 6-футовой сажени в английских фунтах, c — окружность троса в дюймах, R — предельное сопротивление (рвущее усилие) в тоннах.

Переводя эти формулы в метрические меры, получим

$$p = \frac{1}{2692} c^2 \quad \text{или кругло:} \quad \frac{1}{2700} c^2 \qquad (1')$$

$$R = 4.8\, c^2 \qquad (2')$$

причем c — окружность в миллиметрах, p — вес погонного метра троса в килограммах, R — предельное сопротивление в килограммах.

Совершенно так же получим для якорных цепей такие формулы

вес погонного метра

$$p = \frac{1}{40} d^2 \qquad (3)$$

пробное натяжение

$$R_1 = 40\, d^2 \qquad (4)$$

где d есть диаметр железа в миллиметрах, p и R_1 будут выражаться в килограммах. В воде надо для троса уменьшать вес на 15%, для цепи — на $12\frac{1}{2}\%$.

2. Свойства цепной линии

При расчетах нам постоянно придется иметь дело со свойствами цепной линии, поэтому приводим здесь главнейшие формулы, коими эти свойства выражаются (фиг. 1).

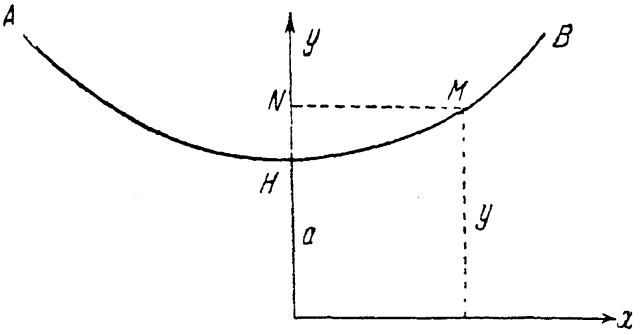
Уравнение цепной линии:

$$y = a \operatorname{ch} \frac{x}{a} \tag{5}$$

где

$$a = \frac{T_0}{p} \tag{6}$$

T_0 есть горизонтальная проекция натяжения (везде одна и та же), иначе, натяжение в вершине H, p — вес погонного метра в тех же единицах, как и T_0, тогда $a = OH$ — параметр цепной линии, а также и ординаты y будут выражаться в метрах. Само собою разумеется, что абсциссы x надо тоже выражать в одинаковых мерах с a, т. е., в нашем случае, в метрах.



Фиг. 1.

Длина дуги

$$HM = s = a \operatorname{sh} \frac{x}{a} \tag{7}$$

Полное натяжение

$$T = T_0 \operatorname{ch} \frac{x}{a} = py \tag{8}$$

При малом значении отношения $\frac{x}{a}$

$$y_1 = HN = \frac{1}{2} \frac{x^2}{a} \tag{9}$$

$$s - x = \frac{1}{6} \frac{x^3}{a^2} \tag{10}$$

$$T = T_0 \left(1 + \frac{y_1}{a}\right) \tag{11}$$

3. Натяжение буксира при разных случаях буксировки

При ходе на тихой воде очевидно, что горизонтальная слагающая натяжения буксира равняется тому упорному давлению, которое имело бы место, если бы буксируемое судно шло с тою же скоростью, но работая

своею машиною, при этом предполагается, что буксир настолько длинен, что можно пренебречь влиянием отброшенной буксирующим судном струи.

Упорное давление можно рассчитать, зная потребную для данной скорости мощность машины, коэффициент же полезного действия можно принять в $\frac{2}{3}$ от индикаторной силы для поршневых машин и от силы на валу для турбин.

Так, например, пусть для скорости 8 узлов $\cong 4$ м/сек. надо на данном корабле развивать 2000 сил, то упорное давление будет

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{2000 \cdot 75}{4} = 25000 \text{ кг} = 25 \text{ т}$$

Понятно, что на *тихой* воде, но при ветре, например налетевшем противном шквале, натяжение буксира не может превзойти того упорного давления, которое имеет место, когда буксирующее судно будет работать полным ходом своей машины, а подвигаться вперед не будет, подобно тому, как на швартовах.

Величина этого упорного давления может быть приближенно рассчитана так, как сделано в следующем примере.

Пусть для буксирующего судна наибольшая сила машины JHP $= 4200$, скорость его хода 14 узлов. Обычная величина скольжения винта — около 20%, следовательно, работая на швартовах, винт отбрасывал бы воду назад со скоростью $v_1 = 1.2 \cdot 14 = 16.8$ узла $= 8.4$ м/сек.

Обозначим через M массу отбрасываемой в секунду воды, тогда по закону живых сил имеем

$$\frac{1}{2} M \cdot 8.4 \cdot 8.4 = 4200 \cdot 75 \qquad (*)$$

Закон же количеств движения дает

$$P = M \cdot 8.4$$

На основании равенства (*) имеем

$$P = 75000 \text{ кг} = 75 \text{ т}$$

Это и есть предельная величина тяги, которую способно производить данное судно, работая полным ходом, *но не дергая буксира.*

Понятно, что могут возникнуть гораздо бóльшие натяжения, если, например, судно уменьшит свой ход так, что буксир ослабнет, а затем оно свой ход сразу увеличит и дернет буксир, но при осторожной буксировке такой случай места иметь не должен, почему мы не будем производить относящиеся к нему довольно сложные расчеты.

Второй и притом неизбежный случай возникновения в буксире значительных натяжений, могущих во много раз превысить среднее нормальное

значение тяги, — это когда буксировка происходит на взволнованном море или крупной зыби.

Дело в том, что при ходе в разрез волны или косвенным к волне курсом оба судна, участвуя в орбитальном движении частиц воды, то между собою сближаются, то удаляются, вследствие чего натяжение буксира все время изменяется.

При таком орбитальном движении центр тяжести каждого из судов, предполагая это судно свободным, описывал бы около своего среднего положения орбиту, уравнение коей вида

$$x = a \cos \frac{2\pi t}{\tau}$$

$$y = b \sin \frac{2\pi t}{\tau}$$

где τ — период волны, a и b — некоторые постоянные для данного судна и данной волны, вычисление которых показано в моей „Общей теории качки корабля на волнении".

Здесь нет надобности приводить эти вычисления, достаточно сказать, что величины a и b не больше $\frac{1}{2}$ высоты волны.

Таким образом, будет

$$x'' = -\frac{4\pi^2}{\tau^2} a \cos \frac{2\pi t}{\tau}$$

и наибольшее значение этого ускорения есть

$$\frac{4\pi^2}{\tau^2} a = w$$

Возьмем, например, высоту волны 8 м, значит $a = 4$ м и пусть $\tau = 10$ сек., тогда ускорение будет

$$w = \frac{4\pi^2}{100} 4 = 1.6 \text{ м/сек.}^2$$

Следовательно, чтобы воспрепятствовать судну, вес коего Q, совершать это орбитальное движение, надо было бы к нему приложить силу

$$X = \frac{Q}{g} \cdot x''$$

наибольшее значение которой было бы

$$X_{max} = \frac{Q}{g} w = \frac{Q}{9.8} \cdot 1.6 = \frac{1}{6} Q$$

т. е. до $\frac{1}{6}$ веса судна.

Ясно, что когда и буксируемое и буксирующее суда большие, то сила X действия волны настолько велика, что орбитальное движение *остановлено быть не может* — буксир должен быть рассчитан и устроен так, чтобы

он эту „игру“ свободно дозволял, т. е. чтобы расстояние между судами могло изменяться на величину

$$2a = h$$

где h — высота волны без того, чтобы в буксире возникали натяжения, превышающие его прочность, в противном случае буксир на волнении лопнет.

Вот на этот-то самый тяжелый случай буксировки и надлежит рассчитывать буксир и все буксирное устройство.

Этот расчет значительно упрощается, если предварительно составить таблички, показывающие основные элементы цепной линии для стального троса избираемой для буксира толщины и для якорных канатов буксируемого корабля, которые также могут служить буксирами, при разной их длине и различном натяжении.

4. Составление таблиц элементов цепных линий

Во всех случаях, с которыми нам придется иметь дело, отношение $x : a$ оказывается настолько малым, что для расчетов можно пользоваться формулами (9), (10), и (11) и даже их еще более упростить, заменив в них абсциссу x крайней точки через полудлину l буксира, так что будет:

стрелка

$$f = \frac{1}{2}\frac{l^2}{a} \tag{9'}$$

$$l - x = \frac{1}{6}\frac{l^3}{a^2} = \frac{1}{3} f \frac{l}{a} \tag{10'}$$

$$\left.\begin{aligned} T &= T_0 \\ a &= \frac{T_0}{p} \end{aligned}\right\} \tag{11'}$$

Эти формулы показывают, что для буксира заданной толщины (p — постоянное), параметр a пропорционален натяжению T_0, стрелка f прямо пропорциональна квадрату длины и обратно пропорциональна параметру, а значит, и натяжению, разность между полудлиною буксира и абсциссою крайней точки (половиною расстояния между судами) пропорциональна кубу длины буксира и обратно пропорциональна квадрату натяжения.

На основании этой пропорциональности, задавая разные длины буксира и разные натяжения, достаточно вычислить элементы для одного случая и множители пропорциональности для всех остальных, чтобы, пользуясь этими множителями, составить всю таблицу.

Так, возьмем для примера буксир 9-дюймовой толщины (по окружности), вес погонного метра такого троса есть 19.89 кг или, кругло, 20 кг, и рассмотрим случай ординарного буксира длиною в 300 и 600 м и двойного

буксира в 300 и 600 м, причем за натяжения будем брать 25 т (штиль), 75 т (шторм), 125 т — предельное допускаемое, равное половине рвущего.

Тогда получаем таблицу множителей (табл. 1).

Таблица 1

Число буксиров	Длина (метры)	Натяжение одного буксира (тонны)	Множители	
			для f	для $l-x$
1	300	25	1	1
		75	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{9}$
		125	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{25}$
1	600	25	4	8
		75	$\frac{4}{3}$	$\frac{8}{9}$
		125	$\frac{4}{5}$	$\frac{8}{25}$
2	300	12.5	2	4
		37.5	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{9}$
		62.5	$\frac{2}{5}$	$\frac{4}{25}$
		125	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{25}$
2	600	12.5	8	32
		37.5	$\frac{8}{3}$	$\frac{32}{9}$
		62.5	$\frac{8}{5}$	$\frac{32}{25}$
		125	$\frac{4}{5}$	$\frac{8}{25}$

Для этого буксира при $T_0 = 25000$ кг $= 25$ т, имеем

$$a = \frac{25000}{20} = 1250 \text{ м}$$

$$f = \frac{1}{2} \cdot \frac{150 \cdot 150}{1250} = 9 \text{ м}$$

$$l - x = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot \frac{150}{1250} = 0.36 \text{ м}$$

Умножая эти величины на указанные выше множители, получим табл. 2.

Таблица 2

9-дюймовый стальной трос

Таблица элементов цепных линий

Число буксиров	Длина буксира, не натянутого (метры)	Натяжение 1 буксира (тонны)	Стрелка (метры)	$l-x$ (метры)	Наибольшая „игра“ α от изменения формы (метры)	Упругое удлинение σ (метры)	Полная „игра“ λ (метры)
1	300	25	9	0.36		0.40	
		75	3	0.04		1.20	
		125	1.8	0.014	0.052	2.00	0.85
1	600	25	36	2.88		0.80	
		75	12	0.32		2.40	
		125	7.2	0.12	0.40	4.00	2.00
2	300	12.5	18	1.44		0.20	
		37.5	6	0.16		0.60	
		62.5	3.6	0.06		1.00	
		125	1.8	0.014	0.29	2.00	1.69
2	600	12.5	72	11.52		0.40	
		37.5	24	1.28		1.20	
		62.5	14.4	0.45		2.00	
		125	7.2	0.11	2.34	4.00	5.14

Упругое удлинение рассчитано так:

Площадь сечения $S=\frac{20\cdot 1000}{8\cdot 100}=25$ см^2

Модуль упругости троса $=\frac{1}{3}$ модуля упругости проволоки $=750\,000$ кг/см^2.

$$\text{При } T_0=25000 \text{ кг будет } \sigma=\frac{25000\cdot 300}{750000\cdot 25}=0.40 \text{ м.}$$

для длины 300 м, остальное — по пропорции.

Числа α представляют удвоенную разность значений чисел $l-x$, соответствующих наибольшему натяжению буксира (125 т) и силе тяги в 75 т, т. е. $T_0=75$ т для одинарного буксира и $T_0=37.5$ т для двойного. Наконец, числа λ получаются, придав к α разность значений σ для вышеуказанных значений T_0.

Табл. 2 с ясностью показывает, насколько малую „игру“ допускает буксир из стального троса, даже в том случае, когда в нем развиваются

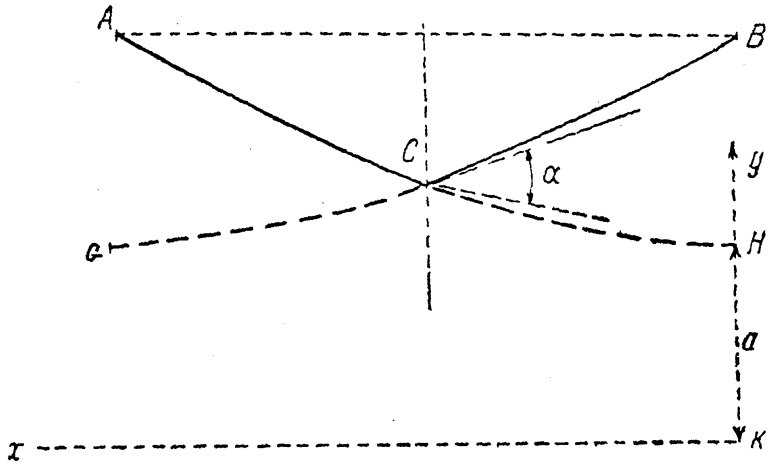
напряжения в половину предельного, т. е. такие, которые надо считать опасными.

Ниже мы подробнее остановимся на этом вопросе.

5. Влияние груза, привешенного к буксиру

Чтобы получить „бóльшую игру", к буксиру привешивают обыкновенно посредине тяжелый груз.

Определим элементы цепной линии для этого случая.



Фиг. 2.

В этом случае буксир примет изображенную на фиг. 2 форму, состоящую из двух одинаковых дуг AC и CB цепных линий ACH и BCG.
Пусть $AC=CB=l$ и привешенный груз есть P.
Так как сила тяги известна, то по формуле

$$a=\frac{T_0}{p} \tag{1}$$

найдем параметр a наших цепных линий.
Затем имеем для точки $C(x,y)$

$$\frac{1}{2}P=T_0\operatorname{tg}\alpha=T_0\operatorname{sh}\frac{x}{a} \tag{2}$$

Отсюда, так как P, T_0 и a известны, найдем абсциссу x точки C.

Затем имеем

$$CH=a\operatorname{sh}\frac{x}{a}$$

Значит, дуга AH будет

$$AH=l+a\operatorname{sh}\frac{x}{a}=a\operatorname{sh}\frac{x_1}{a} \tag{3}$$

откуда найдем абсциссу x_1 точки A и по формуле

$$y_1 = a \operatorname{ch} \frac{x_1}{a} \tag{4}$$

ее ординату.
А так как абсцисса точки C известна, то ее ординатой будет

$$y = a \operatorname{ch} \frac{x}{a}$$

и, значит, стрелка

$$f = y_1 - y \tag{5}$$

Предварительный подсчет, в подробности которого не будем вдаваться, показывает, что для *двойного* 9-дюймового буксира в 600 м длины, чтобы получить заметный эффект, надо брать груз P от 20 до 30 т.

Для примера покажем во всех подробностях расчеты для следующего случая

$$\begin{aligned} 2l &= 600 \text{ м} \\ p &= 20 \text{ кг/м} \\ T_0 &= 75000 \text{ кг} \\ P &= 30000 \text{ кг} \end{aligned}$$

так как для одного буксира $T_0' = 37500$ кг, то будет

$$a = \frac{T_0'}{P} = \frac{37500}{20} = 1875 \text{ м}$$

$$\operatorname{sh} \frac{x}{a} = \frac{1}{2} P : T_0 = \frac{15000}{75000} = 0.2$$

$$\frac{x}{a} = 0.19825$$

$$\begin{aligned} \log \operatorname{sh} \frac{x}{a} &= \bar{1}.30103 \\ \log a &= 3.27300 \\ \hline \log s &= 2.57403 \\ CH = s &= 375.0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \frac{x}{a} &= \bar{1}.29721 \\ \log a &= 3.27300 \\ \hline \log x &= 2.57021 \\ x &= 371.7 \end{aligned}$$

$$AH = 300 + 375.0 = 675.0 = s_1$$

$$\begin{aligned} \log s_1 &= 2.82930 \\ \operatorname{colog} a &= \bar{4}.72700 \\ \hline \log \operatorname{sh} \frac{x_1}{a} &= \bar{1}.55630 \\ \frac{x_1}{a} &= 0.35266 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log \frac{x_1}{a} &= \bar{1}.54735 \\ \log a &= 3.27300 \\ \hline \log x_1 &= 2.82035 \\ x_1 &= 661.2 \end{aligned}$$

$\frac{x}{a}=0.19825$; $\log \operatorname{ch}\frac{x}{a}=0.00848$

$\log a=3.27300$

$\log y=3.28148$

$y=1912.0$

$\frac{x_1}{a}=0.35266$; $\log \operatorname{ch}\frac{x_1}{a}=0.02646$

$\log a=3.27300$

$\log y_1=3.29946$

$y_1=1992.8$

Стрелка $f=y_1-y=1992.8-1912.0=80.8$ м.
Расстояние между судами $2(x_1-x)=579.0$ м.

Затем для $T_0=250000$ кг имеем

$$a=\frac{125000}{20}=6250 \text{ м}; \quad \log a=3.79588$$

$$\frac{1}{2}P:T_0=\frac{15000}{250000}=0.06=\operatorname{sh}\frac{x}{a}; \qquad \frac{x}{a}=0.05997$$

$\log \frac{x}{a}=\bar{2}.77793$

$\log a=3.79588$

$\log x=2.57381$

$x=374.8$

$s=a \operatorname{sh}\frac{x}{a}=375.0$

$s_1=675.0$

$\log s_1=2.82930$

$\operatorname{colog} a=\bar{4}.20412$

$\log \operatorname{sh}\frac{x_1}{a}=\bar{1}.03242$

$\frac{x_1}{a}=0.1078$

$\log \operatorname{ch}\frac{x}{a}=0.00078$

$\log y=3.79666$

$y=6261.3$

$\log \operatorname{ch}\frac{x_1}{a}=0.00252$

$\log y_1=3.79840$

$y_1=6286.4$

$\log \frac{x_1}{a}=\bar{1}.03262$

$\log a=3.79588$

$\log x_1=2.82850$

$x_1=673.7$

$f=y_1-y=25.1$ м

$2(x_1-x)=597.8$ м

Сравнивая с предыдущим, видим, что

$$\alpha=597.8-579.0=18.8 \text{ м}$$

Таким образом, с грузом в 30 т на средине длины буксир *из двух* стальных проволочных тросов 9-дюймовой толщины, длиною в 600 м (300 сажен) дает при изменении в нем напряжения от 75 до 250 т „игру“ в 18.8 м, к которой присоединяется еще 2.8 м от упругого его растяжения, так что всего получается **21.6 м.**

Произведя совершенно подобный расчет, увидим, что при грузе в 20 т тот же буксир дает „игру“ в $12.6+2.8=15.4$ м.

Этот пример с ясностью показывает пользу, получаемую от подвешивания груза, и одновременно, что этот груз должен быть весьма значителен а обращение с таким грузом или грузами, если он подразделен на несколько частей, может представить на практике большие затруднения

Таблица 3

Двойная цепь; $p = 160$ кг, в воде 140 кг; $2l = 300$ м

$T'_0 = \frac{1}{2} T_0$	$\log T'_0$	$\log a$	$\log \frac{l}{a} = \log \operatorname{sh} \frac{x}{a}$	$\frac{x}{a}$	$\log \frac{x}{a}$	$\log x$	x	$\frac{\log \operatorname{ch} \frac{x}{a}}{2 \log \frac{x}{a}}$	$\log y$	y	a	$y - a = f$	$l - x$	α
37.5	1.5740	2.4279	$\bar{1}.7482$	0.5343	$\bar{1}.7278$	2.1557	143.1	0.0593	2.4872	307.1	267.9	39.2	6.9	13.4
62.5	1.7959	2.6498	$\bar{1}.5263$	0.3300	$\bar{1}.5185$	2.1683	147.3	0.0232	2.6730	471.0	446.5	24.5	2.7	
87.5	1.9420	2.7959	$\bar{1}.3302$	0.2377	$\bar{1}.3760$	2.1719	148.6	0.0121	2.8080	642.7	625.0	17.7	1.4	
112.5	2.0512	2.9051	$\bar{1}.2710$	0.1356	$\bar{1}.2686$	2.1737	149.2	0.0074	2.9125	817.6	803.5	14.1	0.8	
137.5	2.1383	2.9922	$\bar{1}.1839$	0.1521	$\bar{1}.1821$	2.1743	149.4	0.0050	2.9972	993.6	982.2	11.4	0.6	
162.5	2.2109	3.0648	$\bar{1}.1113$	0.1288	$\bar{1}.1099$	2.1747	149.5	$\bar{2}.2198$	0.9836		1161	9.6	0.5	
187.5	2.2730	3.1269	$\bar{1}.0492$	0.1117	$\bar{1}.0481$	2.1750	149.6	$\bar{2}.0962$	0.9221		1339	8.4	0.4	
212.5	2.3274	3.1813	$\bar{2}.9948$	0.0986	$\bar{2}.9939$	2.1752	149.7	$\bar{3}.9878$	0.8681		1518	7.4	0.3	
237.5	2.3757	3.2296	$\bar{2}.9465$	0.0883	$\bar{2}.9460$	2.1756	149.8	$\bar{3}.8920$	0.8206		1697	6.6	0.2	
						$l = 225$ м								
37.5	1.5740	2.4279	$\bar{1}.9243$	0.7637	$\bar{1}.8829$	2.3108	204.5	0.1159	2.5438	349.8	267.9	81.9	20.5	
137.5	1.1383	2.9922	$\bar{1}.3600$	0.2271	$\bar{1}.3562$	2.3484	223.1	0.0111	3.0033	1007.6	982.2	25.4	1.9	37.2
187.5	2.2730	3.1269	$\bar{1}.2253$	0.1672	$\bar{1}.2232$	2.3501	223.9	0.0060	3.1329	1358	1339	19.0	1.1	38.6
62.5	1.7959	2.6498	$\bar{1}.7024$	0.4848	$\bar{1}.6765$	2.3263	212.0	0.0492	2.6990	500.0	446.5	53.5	13.0	15.0
87.5	1.9420	2.7959	$\bar{1}.5563$	0.3527	$\bar{1}.5474$	2.3433	220.4	0.0265	2.8224	664.4	625.0	39.4	4.6	31.8

6. Буксиры цепные

Для цепи, в нашем случае $3\frac{1}{4}$ дюйма, для которой, следовательно, $p = 160$ кг (p' в воде $= 140$ кг), $R_1 = 256$ т предпочтительнее производить расчет по точным формулам, ибо при малых натяжениях отношение $\frac{x}{a}$ имеет такое значение, что пришлось бы брать и вторые члены в разложениях в ряды.

Расчеты эти приведены в табл. 3, а их результаты даны в табл. 4.

Таблица 4

Буксир из двух цепей: $d = 80$ мм

Число буксиров	Длина буксира (метры)	Натяжение одного буксира (тонны)	Стрелка f (метры)	$l - x$ (метры)	Наибольшая „игра“ от изменения формы (метры)	Упругое удлинение (метры)	Полная „игра“ (метры)
2	300	37.5	39.2	6.9	13.4	0.06	13.5
		62.5	24.5	2.7	5.0	0.10	5.1
		87.5	17.7	1.4	2.4	0.14	2.5
		112.5	14.1	0.8	1.2	0.18	1.4
		137.5	11.4	0.6	0.8	0.22	1.0
		162.5	9.6	0.5	0.6	0.26	0.9
		187.5	8.4	0.4	0.4	0.30	0.7
		212.5	7.4	0.3	0.2	0.34	0.5
		237.5	6.6	0.2	0.0	0.38	0.4

Табл. 4 показывает с ясностью, какую значительную „игру“, и притом происходящую единственно от изменения формы, допускает цепной буксир из *двух* якорных канатов линкора.

Но так как величина этой „игры“ почти на пределе для весьма крупной зыби, то необходимо сделать подобный же расчет, увеличив длину буксира до $l = 450$ м.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ[1]

Задача выражена инж. Н. М. Володиным в следующей форме: „Тело весом $Q=32.5$ т движется в воде равномерно и прямолинейно со скоростью $v_0=10$ км/час под действием внешней силы, поглощаемой сопротивлением воды; требуется определить силу, способную остановить тело в течение 10 сек. по удалении внешней движущей силы. Сопротивление воды P (кг) выражается формулой $P=av^2$, причем $a=80.3$, скорость v в м/сек.“

Обозначим искомую силу через F, массу тела через m и положим

$$\frac{a}{m}=b^2; \qquad \frac{F}{m}=c^2 \tag{1}$$

Тогда уравнение движения тела будет

$$m\frac{dv}{dt}=-(av^2+F) \tag{2}$$

считая время с момента прекращения действия внешней движущей силы и начала действия силы F, имеем начальное условие:
при

$$t=0$$

должно быть

$$v=v_0 \tag{3}$$

По разделении на m и отделении переменных имеем вместо уравнения (2) следующее

$$dt=-\frac{dv}{b^2v^2+c^2} \tag{4}$$

из которого следует на основании (3)

$$t=-\int_{v_0}^{v}\frac{dv}{b^2v^2+c^2}=\int_{v}^{v_0}\frac{dv}{c^2+b^2v^2}$$

[1] Впервые напечатано в журнале „Судостроение“ (1933, № 5).

По условию задачи при $t = T = 10$ сек. должно быть $v = 0$, следовательно

$$T = \int_0^{v_0} \frac{dv}{c^2 + b^2 v^2} = \frac{1}{bc} \int_0^{v_0} \frac{d\left(\frac{bv}{c}\right)}{1 + \left(\frac{bv}{c}\right)^2} = \frac{1}{bc} \operatorname{arctg} \frac{bv_0}{c} \tag{5}$$

Таким образом имеем уравнение

$$T = \frac{1}{bc} \operatorname{arctg} \frac{bv_0}{c} \tag{6}$$

в котором величины b, v_0, T заданы, величина же c неизвестна и должна быть определена из этого уравнения, после чего на основании формулы (1) найдется F.

Уравнение (6) может быть написано так:

$$\operatorname{tg}(bcT) = \frac{bv_0}{c} \tag{7}$$

т. е.

$$c \cdot \operatorname{tg} bTc = bv_0 \tag{7'}$$

Умножив обе части этого равенства на bT и положив

$$bTc = z \qquad \text{и} \qquad b^2 v_0 T = h \tag{8}$$

получим уравнение

$$z \operatorname{tg} z = h \tag{9}$$

Это уравнение встречается во многих вопросах математической физики, поэтому для функции $z \operatorname{tg} z$ составлены таблицы, в которых по значению аргумента z находится значение $z \operatorname{tg} z$, так что все дело сводится к вычислению величины h и к приисканию по сказанной таблице соответствующего значения z.

В нашем случае численные данные таковы

$$Q = 32\,500 \text{ кг}; \qquad m = \frac{Q}{g} = \frac{32500}{9.81} = 3313; \qquad T = 10 \text{ сек.}$$

$$b^2 = \frac{80.3}{3313} = 0.02424; \qquad b = 0.1557; \qquad v_0 = \frac{10000}{3600} = 2.78 \text{ м/сек.}$$

$$h = b^2 v_0 T = 0.673$$

Так что уравнение (9) будет

$$z \operatorname{tg} z = 0.673$$

и по упомянутой таблице находим

$$z = 0.739$$

Затем

$$c = \frac{z}{bT} = \frac{0.739}{1.557} = 0.4746$$

и, наконец,

$$F = c^2 \cdot m = 0.2252 \cdot 3313 = 746 \text{ кг}$$

Произведем проверку найденного значения силы F.

Мы имеем формулу

$$T = \frac{1}{bc} \operatorname{arctg} \frac{bv_0}{c}$$

$\log b = \bar{1}.1923;$ $\log c = \bar{1}.6763;$ $\log v_0 = 0.4437$

$$\begin{array}{rr} \log b = \bar{1}.1923; & \log b = \bar{1}.1923 \\ \log c = \bar{1}.6763; & \log v_0 = 0.4437 \\ \hline \log bc = \bar{2}.8686; & \operatorname{colog} c = 0.3237 \\ & \hline & \log \frac{bv_0}{c} = \bar{1}.9597 = \operatorname{tg} \alpha \end{array}$$

$$\alpha = 42°21' = 0.739 = \operatorname{arctg}\left(\frac{bv_0}{c}\right)$$

$$\begin{array}{rr} \log \alpha = \bar{1}.8685 & \\ \operatorname{colog} bc = 1.1314 & \\ \hline \log T = 1.0000 & T = 10 \text{ сек.} \end{array}$$

Для рещения уравнения (9) нет необходимости иметь специальную таблицу; это уравнение решается численно весьма просто, если воспользоваться обыкновенными таблицами натуральных тригонометрических функций.

Выразив величину z в градусах, напишем уравнение (9) в виде

$$z^0 \operatorname{tg} z^0 = 57°.3\, h \qquad (9')$$

В нашем случае будет

$$z^0 \operatorname{tg} z^0 = 38°.56$$

и прослеживая числа z^0 и $\operatorname{tg} z^0$ в таблице натуральных величин тригонометрических функций, без труда заметим, что при $z^0 = 43°$ будет

$$43° \cdot 0.9325 = 40°.10$$

при $z^0 = 42°$ будет

$$42° \cdot 0.9004 = 37°.82$$

Значит, при изменении на 1° от 42° до 43° наша функция имеет приращение 2°.28, значит будет

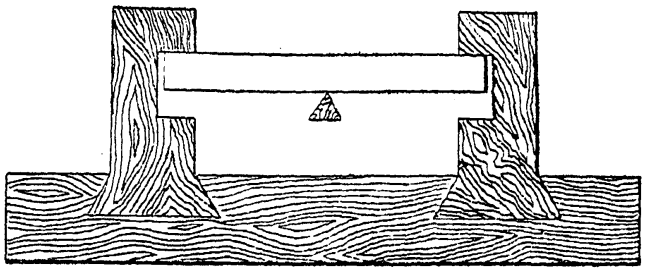
$$z = 42° + 60' \cdot \frac{74}{228} = 42°\,19' = 0.733 + 0.006 = 0.739$$

— результат, совпадающий с предыдущим.

НАБЛЮДЕНИЯ НАД КРЕПОСТЬЮ ЛЬДА И СОПРОТИВЛЕНИЕМ ЕГО ДВИЖЕНИЮ ЛЕДОКОЛА „ЕРМАК“[1]

В декабре 1897 г. были произведены вице-адмиралом С. О. Макаровым испытания над крепостью льда — определялось сопротивление его раздроблению и излому.

Испытания на излом производились в Ньюкастеле в холодильной камере. Брусок льда закладывался в станок (см. фигуру), и на средину этого бруска производилось давление углом деревянной призмы. Величина давления измерялась пружинным динамометром.



Испытание прочности льда на излом

Испытание на раздавливание сделано было в Дургамской высшей технической школе. Давление производилось испытательным рычажным прессом, а бруски льда, приготовленные перед тем в холодильной камере, сохранялись в холоде до самого момента постановки их на станок.

При пробе на раздавливание обнаружилась необходимость между щеками пресса и поверхностями льда помещать прокладки из фланели и дерева, которые уравнивали давление, не допуская щеки пресса давить исключительно на случайно выдающиеся неровности.

Результаты этих испытаний показаны в табл. 1 и 2.

Под названием *„пресный лед“* подразумевается таковой, полученный от замораживания в обыкновенной форме речной воды, употребляемой для питья.

---

[1] Впервые напечатано в книге С. О. Макарова „«Ермак» во льдах“ (1902, гл. XXI). В примечании к этой главе вице-адмирал С. О. Макаров писал: „К обобщению материала по крепости полярного льда я пригласил заведывающего опытным бассейном А. Н. Крылова, который любезно принял на себя труд разобраться в собранных цифрах и, кроме того, воспользовавшись одним из рейсов ледокола „Ермак“, произвел лично некоторые наблюдения на месте. Настоящая статья составлена им.“ — *Ред.*

Таблица 1

Сопротивление льда раздроблению

№ опыта	Сорт льда	Температура льда (°F)	Размеры испытуемого образца (дюймы)			Раздробляющая нагрузка W (тонны)	Предельное сопротивление R (англ. фунты/кв. футы) $R = \frac{W}{ab}$	Предельное сопротивление R_1 (кг/см²) $R_1 = 0.0703\,R$
			a	b	h			
1	Пресноводный	21°	2	2	2	1.3	723	50.8
2		21	2	1.95	2	0.6	345	24.2
3		21	$1\frac{7}{8}$	$1\frac{7}{8}$	$3\frac{3}{4}$	0.6	382	26.7
4		21	$1\frac{3}{4}$	$1\frac{7}{8}$	$3\frac{7}{8}$	0.6	410	28.8
5		21	$3\frac{3}{4}$	$3\frac{7}{8}$	4	2.545	397	28.0
6		21	$3\frac{15}{16}$	$3\frac{7}{8}$	$3\frac{3}{4}$	4.4	646	45.3
7		21	4	$4\frac{1}{8}$	8	3.8	515	36.4
8		21	$3\frac{7}{8}$	$3\frac{13}{16}$	8	3.4	516	36.5
9	Малосолеводный	22	2	2	2	0.8	448	31.5
10		22	2	2	2	0.9	504	35.4
11		22	2	2	4	0.6	336	23.7
12		22	2	2	4	0.7	392	27.5
13		22	4	4	4	2.4	336	24.1
14		20	4	4	4	2.2	308	21.6
15		20	4	4	8	1.8	252	17.7
16		20	4	4	8	1.8	252	17.7
17	Солеводный	15	2	2	2	0.38	213	14.8
18		22	2	2	2	0.50	280	19.6
19		15	2	2	4	0.34	190	13.4
20		22	2	2	4	0.60	336	23.6
21		22	2	2	4	0.50	280	19.6
22		22	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{4}$	$4\frac{1}{4}$	1.4	276	19.4
23		22	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{4}$	1.4	256	18.0
24		22	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	8	1.6	292	20.4
25		22	$3\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	8	1.4	256	18.0

Примечание. Размер h при испытании ставился по линии давления.

Таблица 2

Сопротивление льда излому

№ опыта	Сорт льда	Размеры бруска (англ. дюймы)			Ломающая нагрузка W (англ. фунты)	Предельное сопротивление T (англ. фунты/кв. дюймы) $T = \frac{3}{2} \frac{W}{b} \frac{L}{h^2}$	Предельное сопротивление T_1 (кг/см²) $T_1 = 0.0703\ T$	Примечания
		длина между опорами L	ширина b	высота h				
1	Пресноводный	6	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{3}{16}$	193	169	11.8	Нагрузка прилагалась по средине бруска, направлена по размеру h
2		6	$2\frac{1}{16}$	$2\frac{5}{32}$	178	168	11.7	
3		6	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{3}{32}$	182	175	12.3	
4	Малосоленоводный	6	$2\frac{3}{32}$	$2\frac{1}{4}$	115	88	6.2	
5		6	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{1}{8}$	62	58	4.0	
6		6	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{1}{8}$	100	94	6.5	
7		6	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{1}{8}$	140	132	9.1	
8	Соленоводный	6	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{1}{4}$	97	77	5.3	Дал трещину при 50 фунтах
9		6	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{1}{8}$	235	221	15.3	
10		6	$2\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{4}$	75	39	2.7	

Соленоводный лед получен от замораживания морской воды, взятой в Немецком море неподалеку от устья р. Тайн. Удельный вес этой воды оказался 1.025.

Лед малосоленоводный получен от замораживания морской воды, к которой добавлено соответственное количество речной воды. Удельный вес смеси был 1.018.

Таблицы эти показывают, что крепость льда представляет большое разнообразие даже при одинаковых размерах испытуемых образцов, их температуры и способа нагрузки. В общем, однако, можно заключить, что лед соленой воды менее крепок, нежели лед пресноводный.

Из приведенных таблиц нельзя усмотреть причин сказанного разнообразия, и лишь дальнейшие исследования в связи с исследованием строения льда и его свойств, как упругого тела, могут объяснить причины этого разнообразия.

Необходимо также оговорить, что величины предельного сопротивления, рассчитанные по формуле $T = \frac{3}{2} \frac{W}{b} \frac{L}{h^2}$, могут служить лишь для качественного сравнения испытанных образцов между собою, так как эта формула заключает в себе целый ряд допущений, сделанных при ее выводе, важнейшие из которых те, что напряжение остается пропорциональным относительному удлинению или сжатию даже до разрушающей нагрузки и что поперечные размеры бруска малы сравнительно с длиною его между опорами.

Для приведенных испытаний последнее допущение нельзя считать имеющим место, первое же не имеет места ни для одного материала, так как пропорциональность напряжения удлинению или сжатию наблюдается лишь до так называемого *предела упругости*, который далеко не достигает до разрушающей нагрузки; поэтому, взяв бруски других размеров, могли бы получить для того же самого льда другие величины T, в виду чего в табл. 2 и показаны не только эти величины, но и размеры тех брусков, для коих они получены.

При испытании льда на раздробление была замечена разница в свойствах льда, именно, что пресноводный лед, после раздробления на прессе, удавалось сжать до $\frac{1}{7}$ первоначальной высоты бруска. Соленоводный же лед при том же давлении спрессовывался всего лишь до $\frac{1}{4}$ первоначальной своей высоты. Не может ли это служить отчасти указанием, что соленоводный лед при сжатии может обнаруживать гораздо большее сопротивление, чем пресноводный.

Во время полярного плавания летом 1899 г., наряду с другими физическими свойствами, исследовалась и крепость льда по сопротивлению его излому. Для этих испытаний служил тот же станок и брались бруски тех же размеров, как и при испытаниях в Ньюкастеле. Бруски вырезались горизонтально. Результаты этих испытаний полярного льда приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что в крепости естественного полярного льда в летнее время замечается такое же разнообразие, как и в крепости льда, приготовленного искусственно. Число опытов недостаточно, чтобы делать из них окончательные выводы, тем не менее вышеприведенные цифры показывают, что летний полярный лед по крепости походит на искусственный лед, испытывавшийся адмиралом С. О. Макаровым в Ньюкастеле.

В связи с крепостью льда находится и общее сопротивление, испытываемое ледоколом при ходе во льду. Для получения некоторых указаний о величине этого сопротивления были произведены наблюдения двух родов: 1) кинематографом был получен ряд снимков, изображающих положения ледокола через промежутки около $\frac{1}{6}$ сек., при проходе его

Таблица 3

Сопротивление полярного льда излому

Месяц и число (1899 г.)	№ образца	Размеры бруска (сантиметры)				Ломающая нагрузка W_1 (пуды)	Ломающая нагрузка W (англ. фунты) $W = 36W_1$	Предельное сопротивление T (англ. фунты/кв. дюймы) $T = \frac{3}{2}\frac{WL}{bh^2}\cdot 6.45$	Предельное сопротивление T_1 (кг/см²) $T_1 = 0.0703T$
		полная длина L_1	длина между опорами L	ширина b	высота h				
Июня 8	1	22.0	14.8	7.4	6.0	3.85	138	74	5.1
	2	22.7	14.8	6.4	6.4	3.70	133	72	5.0
	3	21.4	14.8	5.7	5.0	5.90	212	213	14.8
	4	22.3	14.8	5.8	5.0	5.40	194	192	13.3
	5	22.2	14.8	5.9	5.5	6.30	227	182	12.6
	6	22.2	14.8	6.1	5.5	5.80	209	163	11.3
	7	19.5	14.8	6.2	5.8	4.80	173	119	8.3
	8	21.6	14.8	5.6	5.5	5.78	203	176	12.2
Авг. 6	9	21.4	14.8	6.0	5.2	3.30	119	105	7.3
	10	22.7	14.8	6.0	5.6	5.25	189	144	10.0
	11	22.4	14.8	6.0	5.25	4.15	149	129	8.9
	12	22.7	14.8	6.8	5.8	4.10	147	92	6.4
	13	21.8	14.8	5.65	5.1	2.57	92.5	90	6.2
	14	24.8	14.8	5.9	5.7	3.70	133	99.5	6.9
	15	22.5	14.8	5.7	5.1	3.60	130	126	8.7
	16	22.7	14.8	6.1	5.25	3.40	122	104	7.2
	17	—	—	—	—	—	—	—	—
	18	22.6	14.8	5.4	4.9	1.75	63	70	4.9
	19	22.4	14.8	5.85	5.15	3.57	128	118	8.2
	20	23.0	14.8	5.8	5.3	1.95	70	61	4.2
Авг. 12	22	21.2	14.8	6.2	4.3	3.35	121	151	10.5
	23	20.0	14.8	4.2	4.1	1.43	51.5	104	7.2
	24	21.8	14.8	4.8	4.35	1.57	56.5	89	6.2
Авг. 5	29	20.9	14.8	5.5	5.0	5.40	195	204	14.1
	31	22.4	14.8	6.5	5.7	5.00	180	122	8.5
	32	22.1	14.8	6.3	5.45	4.75	171	131	9.1

Примечание. Нагрузка прилагалась посредине между опорами, направление ее действия по размеру h.

через торос, и 2) квадрантом были измерены изменения угла дифферента при движении ледокола на чистой воде и во льду.

Чтобы по изменениям угла дифферента судить о вертикальной слагающей усилия, действующего на носовую часть ледокола, была составлена табл. 4, для чего воспользовались имеющейся в Опытовом бассейне парафиновой моделью ледокола „Ермак". Масштаб модели $\frac{3}{80}$; она была загружена балластом до водоизмещения, соответствующего полному водоизмещению ледокола (8250 т). За носовую часть, против средины погруженной наклонной части форштевня, были заложены за строп дифференциальные тали, и между талями и стропом введен динамометр. На оконечностях модели поставлены две марки (проволоки, кончавшиеся остриями), у средней части поставлен квадрант с отсчетом до 3′, и на стенке бассейна установлен катетометр, которым и отсчитывалось возвышение марок.

Наблюдение производилось следующим образом: действуя талями, приподнимали носовую часть модели до тех пор, пока стрелка динамометра не устанавливалась на желаемом отсчете. Затем, выждав, пока успокоятся колебания модели, производили отсчеты по катетометру: 1) возвышение носовой марки, 2) возвышение кормовой марки, 3) снова возвышение носовой марки. Между 1-м и 3-м отсчетами бралось затем среднее, разность этих отсчетов не достигала и $\frac{1}{2}$ мм; кроме того, для проверки производился и отсчет по квадранту, дававший непосредственно угол дифферента.

Для примера приводится непосредственная запись первой серии наблюдений над дифферентом „Ермака" при разном давлении на форштевень.

Совершенно подобные испытания были затем произведены при углублениях модели, соответствующих углублению ледокола в 22 фута (водоизмещение 6940 т) и в 19 футов (водоизмещение 5670 т). В каждой серии испытаний последняя нагрузка бралась равной 0, чтобы иметь поверку. Расстояние между марками взято в 3440 мм потому, что это число есть число минут в дуге, длина коей равна радиусу, поэтому дифферент в миллиметрах между марками равен числу минут угла дифферента, что упрощает расчет.

По непосредственно наблюденным величинам, вычитая из соответствующих чисел среднее арифметическое чисел первой и последней строки, составляется первая половина (для модели) табл. 5, вторая половина которой, относящаяся к кораблю, получается по первой масштабным переходом.

Сличение чисел V и VI столбцов показывает, какая точность легко, так сказать, сама собою, получается при применении для определения продольной остойчивости испытания модели, взамен вычисления. При этом надо еще заметить, что производство полной серии наблюдений (для данного водоизмещения) после того, как все налажено, требует всего около часа времени.

Таблица 4

Масштаб модели $\frac{3}{80}$. Водоизмещение модели 1051 русский фунт. Соответствующее водоизмещение ледокола 8250 т при углублении 25 футов. Расстояние между марками на модели 3410 мм. Точка приложения давления на 200 мм позади крайней носовой оконечности, что соответствует 17 футам 3 дюймам в натуре

№ наблюдения	Отсчет по динамометру (русск. фунты)	Отсчет носовой марки по катетометру (миллиметры)	Отсчет кормовой марки по катетометру (миллиметры)	Отсчет угла по квадранту
1	0	484.0	659.2	0°12′
2	20	504.0	647.2	0 45
3	40	526.7	633.0	1 21
4	60	550.6	619.5	2 0
5	80	576.8	604.8	2 39
6	100	602.6	590.3	3 18
7	120	629.7	574.6	4 0
8	140	657.1	558.9	4 45
9	160	686.5	542.2	5 30
10	180	715.7	526.3	6 18
11	200	748.7	506.6	7 12
12	0	484.0	658.5	0 12

Примечание. Отсчет по квадранту 0°12′ при усилии = 0 представляет, так сказать, погрешность индекса. Модель выверена по уровню на ровный киль.

Нанося результаты, относящиеся к кораблю, на график, и приняв затем за аргумент возвышение носовой оконечности, получим табл. 6.

В феврале (23 и 24) 1900 г., на переходе от Кронштадта до Гогланда были произведены наблюдения над изменением углов дифферента при ходе ледокола на чистой воде или в пробитом уже канале и во льду. Оказалось, что при толщине льда около 2 футов, покрытого слоем снега около 1 фута, изменение угла дифферента составляло 0° 24′, чему по табл. 5 соответствует давление в 100 т.

При входе на торос или толстый набивной лед (до 8 футов), когда ледокол подходил перпендикулярно к границе этого льда и, пройдя около $\frac{1}{4} - \frac{1}{5}$ части своей длины, останавливался, угол дифферента после остановки достигал 1°06′, чему соответствует давление в 300 т.

Во время полярного плавания „Ермака“, при проходе через один торос, был произведен ряд снимков кинематографом. Снимки эти были затем

Таблица 5

Для модели				Для модели и корабля		Для корабля			
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
нагрузка (русск. фунты)	повышение носовой марки (миллиметры)	понижение кормовой марки (миллиметры)	дифферент между марками (миллиметры)	угол дифферента, рассчитанный по маркам	угол дифферента, наблюденный по квадранту	давление на форштевень (тонны)	повышение верхней кромки форштевня	понижение верхней кромки ахтерштевня	дифферент, отнесенный к полной длине ледокола
							ф. д.	ф. д.	ф. д.
20	20.0	11.7	31.7	0°32′	0°33′	157	1 10	1 0	2 10
40	42.7	25.9	63.6	1 09	1 09	314	3 9	2 3	6 0
60	66.6	39.4	106.0	1 46	1 48	471	5 10	3 5	9 3
80	92.8	54.1	146.9	2 27	2 27	628	8 2	4 9	12 11
100	118.6	68.6	187.2	3 07	3 06	785	10 5	6 0	16 5
120	145.7	84.3	230.0	3 50	3 48	942	12 9	7 4	20 1
140	173.1	100.1	273.2	4 33	4 33	1099	15 2	8 9	23 11
160	202.5	116.7	319.2	5 19	5 18	1256	17 8	10 2	27 10
180	231.7	132.6	364.3	6 04	6 06	1413	20 4	11 8	32 0
200	264.7	152.3	417.0	6 57	7 00	1570	23 2	13 4	36 6

проектированы на экран, и по ним вычерчены последовательные положения ледокола. По этим положениям были рассчитаны усилия, действовавшие на ледокол, следующим образом: на вышеупомянутом чертеже проведены оси — горизонтальная *ox* и вертикальная *oy* и сняты координаты верхней оконечности форштевня ледокола, для простоты, прямо в миллиметрах, не обращая внимания на масштаб, который удобно ввести лишь для перевода окончательных результатов, и который таков, что 143 мм на чертеже соответствует 10 футам в натуре. Таким образом, чертеж доставляет такую таблицу (табл. 7) движения вышеуказанной точки.

Из табл. 7 можно тотчас же получить величину вертикальной составляющей давления на форштевень; действительно, вертикальное движение рассматриваемой точки настолько медленно, сравнительно с периодом качки ледокола (полный период — около 4 сек.), что можно считать, что угол дифферента равен тому, который соответствует равновесию, и, следовательно, стоит только определить поднятие носовой оконечности форштевня, чтобы по табл. 6 найти и соответствующее ему давление, зная, что ледокол был в полном грузу.

За положение штевня, соответствующее равновесию ледокола на чистой воде, принято среднее между положениями при снимках №№ 1 и 36. От него и будем считать поднятие. Переводя его в футы, получаем табл. 8.

Таблица 6

Ледокол „Ермак“

Поднятие носовой оконечности (футы)	Водоизмещ. $D = 8250$ т. Среднее углубление $H = 25$ футов				Водоизмещ. $D = 6940$ т. Среднее углубление $H = 22$ фута				Водоизмещ. $D = 5670$ т. Среднее углубление $H = 19$ футов			
	углубление форштевня (футы)	углубление ахтерштевня (футы)	угол дифферента	вертикальное давление на форштевень (тонны)	углубление форштевня (футы)	углубление ахтерштевня (футы)	угол дифферента	вертикальное давление на форштевень (тонны)	углубление форштевня (футы)	углубление ахтерштевня (футы)	угол дифферента	вертикальное давление на форштевень (тонны)
1	24.3	25.3	0°20′	85	21.3	22.3	0°20′	75	18.3	19.3	0°20′	65
2	23.5	25.7	0 40	170	20.5	22.7	0 40	150	17.5	19.7	0 40	125
3	22.7	26.2	0 58	255	19.7	23.2	0 57	215	16.7	20.2	0 58	185
4	22.0	26.8	1 15	335	19.0	23.8	1 13	285	16.0	20.8	1 17	245
5	21.2	27.2	1 33	410	18.2	24.2	1 33	350	15.2	21.2	1 35	300
6	20.5	27.5	1 50	480	17.5	24.5	1 54	420	14.5	21.5	1 54	360
7	19.7	27.9	2 09	550	16.7	24.9	2 09	485	13.7	21.9	2 09	415
8	18.9	28.2	2 24	610	15.9	25.2	2 30	545	12.9	22.2	2 27	475
9	18.1	28.7	2 42	680	15.1	25.7	2 48	610	12.1	22.7	2 45	530
10	17.4	29.1	3 00	755	14.4	26.1	3 06	670	11.4	23.1	3 06	585
11	16.7	29.5	3 18	820	13.7	26.5	3 24	735	10.7	23.5	3 24	640
12	15.9	30.0	3 34	890	12.9	27.0	3 40	795	9.9	24.0	3 42	690
13	15.2	30.4	3 52	960	12.2	27.4	3 57	955	9.2	24.4	4 02	750
14	14.3	30.9	4 12	1025	11.2	27.9	4 15	910	8.3	24.9	4 21	800
15	13.6	31.2	4 30	1090	10.6	28.2	4 34	970	7.6	25.2	4 40	850
16	12.9	31.6	4 48	1150	9.9	28.6	4 52	1035	6.9	25.6	4 53	905
17	12.0	32.1	5 06	1210	9.0	29.1	5 10	1090	6.0	26.1	5 11	960
18	11.2	32.5	5 24	1280	8.2	29.5	5 27	1150	5.2	26.5	5 28	1010
19	10.5	32.9	5 42	1340	7.5	29.9	5 45	1205	4.5	26.9	5 45	1060
20	9.7	33.4	6 00	1400	6.7	30.4	6 02	1255				
21	8.9	33.8	6 19	1450	5.9	30.8	6 19	1310				
22	8.2	34.0	6 36	1505	5.2	31.0	6 36	1360				
23	7.4	34.5	6 54	1560	4.4	31.5	6 54	1415				

Примечание. Поднятие носовой оконечности относится к верхней кромке форштевня. Углубления штевней относятся к оконечностям прямой части киля.

Таблица 7

Проход „Ермака“ через торос

Абсциссы (x) и ординаты (y) верхней оконечности форштевня

Масштаб : 143 мм = 10 футов

I	II	III	IV	I	II	III	IV
№ снимка	Пометка снимка	x (миллиметры)	y (миллиметры)	№ снимка	Пометка снимка	x (миллиметры)	y (миллиметры)
1	0— 2	0	46	24	2— 1	576	156
2	0— 3	17	44	25	2— 2	590	145
3	0— 4	44	44	26	2— 3	600	139
4	0— 5	65	41	27	2— 4	609	131
5	0— 6	94	40	28	2— 5	619	120
6	0— 7	119	51	29	2— 6	631	105
7	0— 8	155	60	30	2— 7	639	95
8	0— 9	191	66	31	2— 8	646	80
9	0—10	222	75	32	2— 9	652	70
10	0—11	258	82	33	2—10	661	57
11	0—12	288	88	34	2—11	674	40
12	1— 1	319	98	35	2—12	680	32
13	1— 2	337	105	36	3— 1	683	22
14	1— 3	356	114	37	3— 2	637	31
15	1— 4	374	121	38	3— 3	690	35
16	1— 5	400	124	39	3— 4	—	—
17	1— 6	419	133	40	3— 5	692	43
18	1— 7	444	141	41	3— 6	695	50
19	1— 8	472	150	42	3— 7	—	—
20	1— 9	498	159	43	3— 8	697	62
21	1—10	527	161	44	3— 9	—	—
22	1—11	547	162	45	3—10	695	74
23	1—12	564	159				

Таким образом, в рассматриваемом случае наибольшее вертикальное давление на форштевень достигало до 840 т.

Чтобы получить горизонтальную слагающую давления, надо найти движение центра тяжести ледокола, тогда произведение из массы ледокола на горизонтальную проекцию ускорения его центра тяжести и даст гори-

Таблица 8

Вертикальная составляющая давления на лед при проходе „Ермака“ через торос

№ снимка	Поднятие носовой оконечности (футы)	Вертикальная слагающая давления (тонны)	№ снимка	Поднятие носовой оконечности (футы)	Вертикальная слагающая давления (тонны)
1	0.7	65	25	7.7	675
3	0.6	55	27	6.7	585
5	0.4	35	29	5.0	435
7	1.7	150	31	3.8	335
9	2.9	255	33	1.7	150
11	3 7	325	35	—0.2	—15
13	4.9	430	36	—0.8	—65
15	6.0	525	37	—0.3	—20
17	6.9	605	39	—	—
19	8.0	695	41	1.0	100
21	8.8	775	43	1.9	170
23	8.7	755	45	2.8	245

зонтальную проекцию равнодействующей всех сил, приложенных к ледоколу. Зная же, по работе машины, давление на упорный подшипник, найдем и слагающую давления льда.

Так как угол дифферента ледокола не превышает 3°5 то абсциссы носовой оконечности ледокола отличаются от абсцисс его центра тяжести на величину почти постоянную, поэтому горизонтальные проекции скоростей и ускорений обеих точек равны и вместо движения центра тяжести можно исследовать движения носовой оконечности форштевня. Это исследование можно выполнить или графическим путем, или же аналитически; второй прием предпочтительнее, ибо для нахождения скоростей и ускорений пришлось бы проводить касательные и измерять углы их уклона, что не дает точных результатов, которые тогда сильно зависят от того, как была проведена и сглажена кривая, представляющая зависимость пройденного пространства от времени. Но эту кривую полезно строить для наглядности аналитического расчета. Поступая таким образом и стараясь представить зависимость между пространством и временем, ввиду колебательного характера движения, тригонометрическими функциями, получили следующие формулы

$$x = x_1 + x_2 + x_3 \qquad (1)$$

причем

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= 698 \sin \frac{\pi\tau}{90} \\ x_2 &= 69.8 \sin \frac{\pi\tau}{45} \\ x_3 &= -26 \sin \frac{\pi\tau}{9} && \text{для } \tau \text{ от } 0 \text{ до } 9 \\ x_3 &= -13 \sin \frac{\pi(\tau-12)}{6} && \text{для } \tau \text{ от } 10 \text{ до } 27 \\ x_3 &= -15 && \text{для } \tau \text{ от } 27 \text{ до } 44 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где τ есть число промежутков между снимками, протекших от момента первого снимка до рассматриваемого, x — абсцисса носовой оконечности, выраженная в миллиметрах чертежа, как в табл. 1.

Чтобы видеть, насколько близко представляются наблюдения этими формулами, составлена табл. 9.

Столбец X этой таблицы показывает, что наибольшая разница между величинами x, вычисленными по формуле (1) и снятыми с чертежа, составляет 7 мм, что в натуре соответствует 6 дюймам в пройденном ледоколом пространстве.

При кинематографе, которым производились снимки, нет хронографа, так что нет отметок времени, но зато была замечена первоначальная скорость ледокола $= 7\frac{1}{2}$ узлов. По этой скорости оказывается, что средний промежуток между двумя последовательными снимками равен $\frac{1}{6.212}$ сек. Если бы снимки следовали через ровные промежутки, то числа τ были бы пропорциональны времени, выражая которое в секундах и обозначая его через t, имели бы

$$\frac{\tau}{6.212} = t \quad (3)$$

и, переводя по масштабу длин формулы (1) и (2) к движению ледокола, получили бы

$$x = x_1 + x_2 + x_3 \quad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= 48.8 \sin \frac{\pi t}{14.48} \\ x_2 &= 4.88 \sin \frac{\pi t}{7.24} \\ x_3 &= -1.82 \sin \frac{\pi t}{1.448} && (t \text{ от } 0 \text{ до } 1.45 \text{ сек.}) \\ x_3 &= -0.91 \sin \frac{\pi(t-1.93)}{0.965} && (t \text{ от } 1.61 \text{ до } 4.5 \text{ сек.}) \\ x_3 &= -1.05 && (t \text{ от } 4.6 \text{ до } 7.1 \text{ сек.}) \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

причем x будет выражен в футах и время t в секундах.

Таблица 9

Вычисление: $x = x_1 + x_2 + x_3$; формулы (1) и (2)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
τ	$\frac{\pi\tau}{90}$	$\sin\frac{\pi\tau}{90}$	$x_1=693\times\sin\frac{\pi\tau}{90}$ (миллиметры)	$x_2=69.8\times\sin\frac{\pi\tau}{45}$ (миллиметры)	x_1+x_2 (миллиметры)	x_3 (миллиметры)	$x=x_1+x_2+x_3$ вычисл. (миллиметры)	x наблюденный (миллиметры)	$\delta=x_{\text{н.}}-x_{\text{в.}}=$ $=$ IX — VIII (миллиметры)
0	0°	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0.0349	24.5	4.9	29.4	— 9.0	20	17	—3
2	4	0.0698	49.0	9.7	58.7	—16.7	42	44	+2
3	6	0.1045	73	14.5	87.5	—22.2	65	65	0
4	8	0.1392	97	19.2	116.2	—25.4	91	94	+3
5	10	0.1736	121	23.9	145	—25.4	119.6	119	0
6	12	0.2079	145	28.3	173	—22.2	151	155	+4
7	14	0.2419	169	32.7	202	—16.7	185	191	+6
8	16	0.2756	192	37.0	229	— 9.0	220	222	+2
9	18	0.3090	215	41.0	256	0	256	258	+2
10	20	0.3420	239	44.9	284	+11.3	295	288	—7
11	22	0.3746	261	48.5	310	+ 6.5	316.5	319	+3
12	24	0.4067	283	51.8	335	0	335	337	+2
13	26	0.4384	305	55.0	360	— 6.5	353.5	356	+3
14	28	0.4695	327	57.8	385	—11.3	374	374	0
15	30	0.5000	349	60.4	409	—13.0	396	400	+4
16	32	0.5299	370	62.7	433	—11.3	422	419	—3
17	34	0.5592	390	64.7	455	— 6.5	448	444	—4
18	36	0.5878	410	66.3	476	0	486	472	—4
19	38	0.6157	430	67.7	498	+ 6.5	504	498	—6
20	40	0.6428	449	68.7	518	+11.3	529	527	—2
21	42	0.6691	467	69.4	536	+13.0	549	547	—2
22	44	0.6947	485	69.8	555	+11.3	566	564	—2
23	46	0.7193	502	69.8	572	+ 6.5	578	576	—2
24	48	0.7431	518	69.4	587	0	587	590	+3
25	50	0.7660	534	68.7	603	— 6.5	597	600	+3
26	52	0.7880	550	67.7	618	—11.3	607	609	+2
27	54	0.8090	564	66.3	630	—13.0	617	619	+2
28	56	0.8290	578	64.7	643	—15	628	631	+3
29	58	0.8481	592	62.7	655	—15	640	639	—1

Продолжение табл. 9

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
τ	$\frac{\pi\tau}{90}$	$\sin\frac{\pi\tau}{90}$	$x_1=693\times\sin\frac{\pi\tau}{90}$ (миллиметры)	$x_2=69.8\times\sin\frac{\pi\tau}{45}$ (миллиметры)	x_1+x_2 (миллиметры)	x_3 (миллиметры)	$x=x_1+x_2+x_3$ вычисл. (миллиметры)	x наблюденный (миллиметры)	$\pi=x_н.-x_в.=$ $=$IX—VIII (миллиметры)
30	60	0.8660	604	60.4	664	—15	649	646	—3
31	62	0.8329	616	57.8	674	—15	659	652	—7
32	64	0.8988	627	55.0	682	—15	667	661	—6
33	66	0.9135	633	51.8	690	—15	675	674	—1
34	63	0.9272	647	48.5	695	—15	680	680	0
35	70	0.9397	656	44.9	701	—15	686	683	—3
36	72	0.9511	663	41.0	704	—15	689	687	—2
37	74	0.9613	670	37.0	707	—15	692	690	—2
38	76	0.9703	677	32.7	710	—15	695	—	—
39	78	0.9782	682	28.3	710	—15	695	692	—3
40	80	0.9848	687	23.9	711	—15	696	695	—1
41	82	0.9903	681	19.2	710	—15	695	—	—
42	84	0.9945	694	14.5	708	—15	693	697	+4
43	86	0.9976	696	9.7	706	—15	691	—	—
44	88	0.9994	698	4.9	703	—15	688	695	+7

Масштаб : 143 мм = 10 футов

Продифференцировав дважды эти последние формулы, найдем ускорение, по которому получаем и силу F, действующую на ледокол. Заметив, что масса его $M=\frac{8000}{32.2}=248$, принимая тонну за единицу силы, будем иметь

$$F=F_1+F_2+F_3 \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned} F_1&=M\cdot x_1''=-570\sin\frac{\pi t}{14.48}\ \text{т}\\ F_2&=M\cdot x_2''=-228\sin\frac{\pi t}{7.24}\ \text{т}\\ F_3&=2123\sin\frac{\pi t}{1.448}\ \text{т} \qquad (t\ \text{от}\ \ 0\ \text{до}\ 1.45)\\ F_3&=2630\sin\frac{\pi(t-1.93)}{0.965}\ \text{т} \qquad (t\ \text{от}\ 1.61\ \text{до}\ 4.5)\\ F_3&=0 \qquad (t\ \text{от}\ 4.6\ \text{до}\ 7.1\ \text{сек.}) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Отсюда видно, что для того чтобы вызвать главную часть движения ледокола, надо бы приложить к нему силу F_1+F_2, наибольшая величина

которой не составит и 800 т, но чтобы вызвать те колебания, которые представляются членом x_3 формулы (1), надо бы прикладывать силу, меняющуюся в течение 1.45 сек. от $+2123$ т до -2123 т, затем в течение 0.965 сек. — от $+2630$ т до -2630 т.

Если и можно вообразить усилие в -2630 т (знак минус означает: направленное к корме) происходящим от ударов о лед, то нельзя себе представить ни в машине ледокола, ни во льду причины усилия в $+2630$ т, направленного в нос.

Причину эту надо искать не в движении ледокола, а в том предположении, которое было сделано при выводе формул, именно, что *снимки следовали один за другим через равные промежутки времени.* Между тем, ручка кинематографа вертелась прямо рукою, и, следовательно, трудно и ожидать полной равномерности движения его барабана, в особенности, в течение одного оборота, поэтому, естественно, член x_3 отнести не к движению ледокола, а принять его за неравенство, происходящее от неравномерности движения барабана кинематографа, при которой зависимость между τ и t уже не будет выражаться формулой

$$\frac{\pi}{6.212} = t \tag{3}$$

а иною. Приняв формулу (3), мы тем самым внесли в движение ледокола неравенство, аналогичное тому, которое внеслось бы в движение небесных тел, если бы время выражать в истинных солнечных сутках и считать их величину за постоянную.

Если построить кривую, изображающую зависимость x от τ (по числам табл. 1), и затем кривую $x_1 + x_2$ и, вынеся точки этой последней на первую, найти соответствующие им значения τ и взять разницы этих значений и соответственных №№ снимков, то и получим погрешности формулы (3), выраженные в долях средней продолжительности промежутка между снимками, равного $\frac{1}{6.21}$ сек.

Представляя эту разницу аналитически, получаем такие формулы

$$\left.\begin{aligned} t_1 &= \tau - 0.9 \sin\frac{\pi\tau}{9} && (\tau \text{ от } 0 \text{ до } 11)\\ t_1 &= \tau - 0.6 \sin\frac{\pi(\tau - 12.5)}{6} && (\tau \text{ от } 12 \text{ до } 27)\\ t_1 &= \tau - 1 && (\tau \text{ от } 28 \text{ до } 44) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

и

$$\frac{t_1}{6.21} = t$$

и

$$\left.\begin{aligned} x &= 698 \sin\frac{\pi t_1}{90} + 69.8 \sin\frac{\pi t_1}{45} && (t_1 \text{ от } 0 \text{ до } 27)\\ x &= 698 \sin\frac{\pi(t_1 + 1)}{90} + 69.8 \sin\frac{\pi(t_1 + 1)}{45} && (t_1 \text{ от } 27 \text{ до } 43) \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

выражая x в масштабе чертежа в миллиметрах

Таблица 10

Вычисление исправленных моментов снимков и положения ледокола

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
τ	$\frac{\pi\tau}{90}$	$t_1-\tau$	t_1	$\frac{\pi t_1}{90}$	$\sin\frac{\pi t_1}{90}$	$x_1=698\sin\frac{\pi t_1}{90}$ (миллиметры)	$\frac{\pi t_1}{45}$	$\sin\frac{\pi t_1}{45}$	$x_2=69.3\sin\frac{\pi t_1}{45}$ (миллиметры)	$x=x_1+x_2$ вычислен. (миллиметры)	x наблюд. (миллиметры)	$\delta=x_н-x_в$ (миллиметры)
0	0°	0	0	0°	0	0	0°	0	0	0	0	0
1	2	—0 3	0.7	1.4	0.025	17.4	2.8	0.049	3.4	20.8	17	—3.8
2	4	—0.55	1.45	2.9	0.050	34.9	5.8	0.101	7.0	41.9	44	+2.1
3	6	—0.75	2.25	4.5	0.078	55.7	9.0	0.156	10.9	65.6	65	—0.6
4	8	—0.9	3.10	6.2	0.108	75.4	12.4	0.215	15.0	90.4	94	+3.6
5	10	—0.9	4.10	8.2	0.142	99.1	16.4	0.282	19.7	118.8	119	+0.2
6	12	—0.75	5.25	10.5	0.188	131.2	21.0	0.358	25.0	156.2	155	—1.2
7	14	—0.55	6.45	12.9	0.223	155.5	25.8	0.435	30.4	185.9	191	+5.1
8	16	—0.30	7.70	15.4	0.265	185.0	30.8	0.512	35.8	220.8	222	+1.2
9	18	0.00	9.00	18.0	0.309	215.5	36.0	0.588	41.2	256.7	258	+1.3
10	20	+0.30	10.3	20.6	0.352	245.5	41.2	0.658	46.0	291.5	288	—3.5
11	22	+0.40	11.4	22.8	0.338	270.7	45.6	0.715	50.0	320.7	319	—1.7
12	24	+0.20	12.2	24.4	0.413	288.0	48.8	0.753	52.5	340.5	337	—3.5
13	26	—0.20	12.8	25.6	0.432	301.5	51.2	0.779	54.4	355.9	356	+0.1
14	28	—0.40	13.6	27.2	0.457	319.0	54.4	0.813	56.8	375.8	374	—1.8
15	30	—0.60	14.4	28.8	0.482	336.5	57.6	0.845	59.0	395.5	400	+4.5
16	32	—0.60	15.4	30.8	0.512	357.2	61.6	0.879	61.5	418.7	419	+0.3
17	34	—0.40	16.6	33.2	0.547	382.0	66.4	0.909	63.5	445.5	444	—1.5
18	36	—0.20	17.8	35.6	0.583	407.0	71.2	0.946	66.0	473.0	472	—1.0
19	38	+0.20	19.2	38.4	0.621	434.3	76.8	0.974	68.0	502.3	498	—4.3
20	40	+0.40	20.4	40.8	0.654	456.0	81.6	0.989	69.2	525.2	527	+1.8
21	42	+0.60	21.6	43.2	0.634	477.5	86.4	0.998	69.8	547.3	547	—0.3
22	44	+0.60	22.6	45.2	0.710	495.5	90.4	1.000	69.8	565.3	564	—1.3
23	46	+0.40	23.4	46.8	0.729	509.0	91.6	0.999	69.8	578.8	576	—2.8
24	48	+0.20	24.2	48.4	0.748	522.0	96.8	0.993	69.7	591.7	590	—1.7
25	50	—0.20	24.8	49.6	0.762	532.0	99.2	0.987	69.0	601.0	600	—1.0
26	52	—0.40	25.6	51.2	0.779	544.0	102.4	0.977	68.2	612.2	609	—3.0
27	54	—0.60	26.4	52.8	0.797	556.0	105.6	0.964	67.5	623.5	619	—4.5

Остальные величины те же, что в табл. 9.

Масштаб: 143 мм = 10 футов

и

$$\left.\begin{aligned} x &= 48.8 \sin \frac{\pi t_1}{90} + 4.88 \sin \frac{\pi t_1}{45} && (t_1 \text{ от } 0 \text{ до } 27) \\ x &= 48.8 \sin \frac{\pi (t_1 + 1)}{90} + 4.88 \sin \frac{\pi (t_1 + 1)}{45} && (t_1 \text{ от } 27 \text{ до } 43) \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

выражая x в футах.

Чтобы видеть, в какой мере формулы (8) и (9) воспроизводят наблюдения (табл 1), составлена табл. 10.

Столбец XIII этой таблицы показывает, что наибольшая разница составляет 5.1 мм, что соответствует 4 дюймам в пройденном ледоколом пространстве, и, значит, формулы (8) и (9) представляют его движение с достаточной точностью.

Приняв эти формулы, увидим, что действующая на ледокол сила будет выражаться первыми двумя членами формулы (6), т. е.

$$F = -\left(570 \sin \frac{\pi t}{14.48} + 228 \sin \frac{\pi t}{7.24}\right)$$

где t выражено в секундах и F в тоннах; давая в этой формуле t такие значения, чтобы было последовательно 6.21 t равно 0, 2, 4, 6, . . . , 44 и, вычисляя соответственно F, получим величины этой силы в моменты, весьма близкие к моментам 1, 3, 5, 7, . . . , 45 снимков. Результаты этого расчета и показаны в табл. 11.

Таблица 11

Горизонтальная слагающая усилия, действовавшего на ледокол „Ермак“ при проходе через торос

№ снимка	Сила (тонны)	№ снимка	Сила (тонны)	№ снимка	Сила (тонны)
1	0	17	507	33	692
3	72	19	553	35	687
5	142	21	592	37	676
7	212	23	624	39	660
9	279	25	650	41	638
11	342	27	668	43	613
13	402	29	684	45	602
15	457	31	693		

Табл. 11 показывает, что наибольшая величина горизонтальной слагающей действующего на ледокол усилия почти равна 700 т. Эта сила представляет собою избыток сопротивления, встречаемого ледоколом, над движущею силою винтов, а так как эта последняя равна приблизительно 125 т,

то полная величина горизонтальной слагающей давления на лед достигает 825 т; в то же самое время, как показано выше, вертикальная слагающая составляет 840 т, следовательно, полная величина давления равна почти 1250 т и направление его составляло угол, приблизительно, в 45° с горизонтом.

Вкратце вышеизложенное можно резюмировать следующим образом.

Наблюдения показали, что при ходе во льду толщиною около 2 футов, со скоростью 6—7 узлов, при полной работе всех четырех машин, вертикальная слагающая давления льда на носовую часть ледокола составляет около 100 т. Горизонтальная слагающая этого давления, рассчитанная приблизительно по силе машин — около 125 т.

При проходе через торос вертикальная составляющая давления на лед достигла 840 т, горизонтальная — 825 тонн. Величина вертикальной слагающей в последнем случае показывает, что ледоколу необходимо обеспечивать и значительную общую продольную крепость, помимо местной, ибо изгибающий момент, происходящий от одной этой слагающей, составляет $\frac{1}{20}$ произведения из водоизмещения ледокола на его длину, т. е. такую величину, которой он редко достигает на судах размеров „Ермака“ на волнении.

О РАВНОВЕСИИ ШАРОВОЙ МИНЫ НА ТЕЧЕНИИ[1]

§ 1. Рассмотрение условий равновесия шаровой мины, поставленной на течении, помимо того, что оно представляет собою любопытную задачу статики, имеет и некоторое практическое значение.

Эта задача не раз разбиралась мною на занятиях со слушателями Морской академии, но ввиду того, что вопрос этот был мне как-то предложен и в Минном отделе Морского технического комитета, я решил напечатать данное мною исследование этой задачи в „Известиях по минному делу".

Задача. *Шаровая мина данных размеров, плавучести и веса поставлена на течении, скорость которого одна и та же по всей глубине и также известна. Требуется определить: 1) положение равновесия мины, 2) форму, принимаемую минрепом, 3) зависимость между длиною минрепа, плавучестью мины и глубиною ее погружения при разных скоростях течения.*

Для решения этой задачи возьмем за координатную плоскость zx вертикальную плоскость, проходящую через точку B прикрепления минрепа к якорю и через направление течения. Начало координат возьмем в точке A прикрепления минрепа к мине, ось z направим вертикально, вниз, ось x — горизонтально *навстречу* течению.

Очевидно, что при таком выборе осей как минреп, так и диаметральная плоскость мины расположатся в плоскости zx.

Пусть будет: точка O (фиг. 1) центр величины мины, практически совпадающий с геометрическим ее центром, ибо размеры и объем треноги, буде таковая есть, ничтожны по сравнению с объемом мины, G — центр тяжести мины и A, как уже сказано, — точка закрепления минрепа, неизменно связанная с корпусом мины.

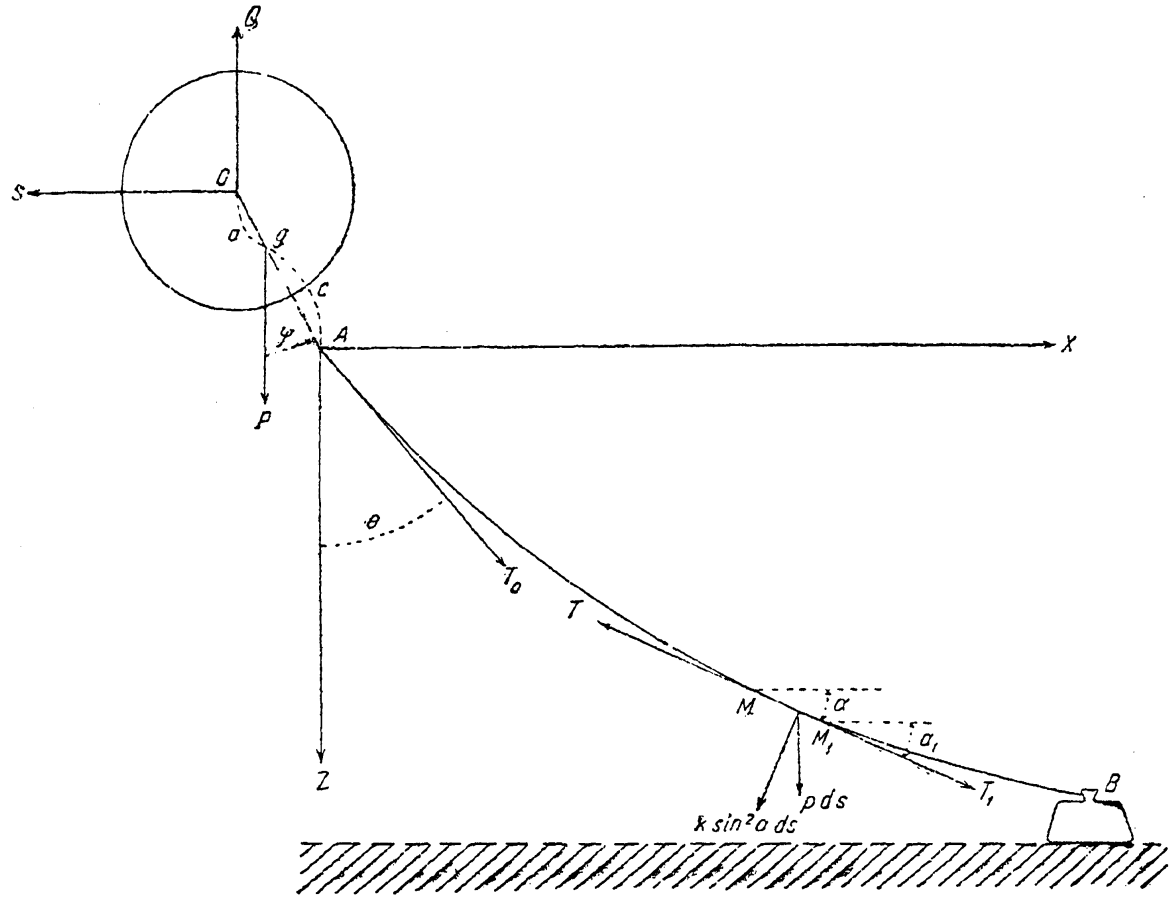
Обозначим через φ угол наклонения прямой OG, которую будем называть осью мины, считаемый от отвесной линии, и через θ — угол наклонения касательной к минрепу в точке A.

---

[1] Впервые напечатано в „Известиях по минному делу" (1909, вып. 44).

Пусть будет, кроме того, P — вес мины, Q — плавучесть мины, S — давление текущей воды на мину, T_0 — натяжение минрепа в точке A. Длины:

$$OG=a \quad \text{и} \quad GA=c$$



Фиг. 1.

Тогда для равновесия мины мы имеем следующие условия

$$T_0 \sin\theta - S = 0 \tag{1}$$

$$P + T_0 \cos\theta - Q = 0 \tag{2}$$

$$Pc \sin\varphi - Q(c+a)\sin\varphi + S(c+a)\cos\varphi = 0 \tag{3}$$

Из этих уравнений находим

$$T_0 = \sqrt{S^2 + (Q-P)^2} \tag{4}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{S}{Q-P} \tag{5}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{S(c+a)}{Q(c+a) - Pc} \tag{6}$$

Обозначим через Q_1 чистую плавучесть мины, т. е. разность $Q - P$, тогда предыдущие уравнения напишутся так

$$T_0 = \sqrt{S^2 + Q_1^2} \tag{7}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{S}{Q_1} \tag{8}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{S(c+a)}{Q_1(c+a) + Pa} \tag{9}$$

Из уравнения (7) и (8) видно, что *натяжение и угол уклона верхнего элемента минрепа не зависят от места его прикрепления к мине, а определяются величиною чистой плавучести мины и сопротивлением ее течению.*

Величина давления S текущей воды на шаровую мину может быть рассчитываема по следующей формуле

$$S = k\, q\, v^2 \tag{10}$$

где q есть площадь диаметрального сечения мины, v — скорость течения и k — некоторый коэффициент, определяемый опытом.

Такие опыты над сопротивлением, встречаемым движущимся в воде шаром, были произведены еще в 1797 г. полковником Бофуа и дали следующий результат:[1]

Шар диаметром 13.54 дюйма.

Площадь сечения $q = 144$ кв. дюйма $= 1$ кв. фут.

Сопротивление этого шара движению при погружении в 6 футов дается следующей таблицей:

Скорость (футы в секунду)	Сопротивление (английские фунты)
1	0.3982
2	1.5614
3	3.446
4	6.027
5	9.285
6	13.206
7	17.773
8	22.981
9	28.802
10	35.25
11	42.31
12	49.98
13.527	62.85

Из этой таблицы следует, что при скоростях около 5 футов в секунду коэффициент k равен 0.3714, если q выражать в кв. футах и сопротивление S — в английских фунтах. Если же от английских мер перейти к метри-

[1] Nautical and Hydraulical Experiments... by Colonel Mark Beaufoy, pp. 474, 481.

ческим и скорости течения выражать в *узлах*, то формула (10) может быть написана так

$$S = 5.2\, q\, v^2 \qquad (10')$$

Причем, повторяем, q надо брать в кв. метрах, v — в узлах, S получится в килограммах.

Так, например, для нашей мины $q = 0.45$ м^2, и формула (10′) принимает вид

$$S = 2.34\, v^2$$

и, следовательно, величина S будет даваться такою таблицей:

Скорость течения (узлы)	Сопротивление мины (килограммы)
1	2.34
2	9.35
3	21.1
4	37.5
5	58.5

Плавучесть этой мины $Q = 225$ кг.
Вес мины с зарядом $P = 168$ кг.
Чистая плавучесть $Q_1 = Q - P = 57$ кг.
Расстояние $OG = a = 6.0$ см.

Положим, что минреп был бы закреплен за самый корпус мины в низшей его точке, тогда будет $c = 32$ см, и формула (9) принимает такой вид

$$\operatorname{tg}\varphi = S\frac{38}{57 \cdot 38 + 168 \cdot 6} = 0.012\, S \qquad (9')$$

и, следовательно, наклонение мины при разных скоростях течения будет представляться следующей таблицей:

Скорость V (узлы)	Уклон мины φ	Уклон минрепа θ
1	1°6	2°3
2	6.3	9.3
3	14.2	20.3
4	24.3	33.3
5	35.1	45.6

Положим теперь, что точка прикрепления минрепа вынесена снаружи корпуса мины, например на величину, равную радиусу мины (38 см), тогда $c = 70$ см, и у нас будет

$$\operatorname{tg}\varphi = S\frac{76}{57 \cdot 70 + 168 \cdot 6} = 0.0163\, S$$

и тогда углы φ будут даваться такою таблицей:

Скорость V (узлы)	Уклон мины φ
1	2°1
2	8.7
3	19.0
4	31.3
5	43.7

Вообще по мере увеличения c угол φ будет приближаться к θ, с которым он и сравняется при весьма большом c.

Заметим, что как из формулы (9), а еще нагляднее из приведенных таблиц, видно, что $\varphi < \theta$, и мина стоит на течении как показано на схематическом чертеже (фиг. 1).

Как видно, угол уклона мины φ зависит от места прикрепления минрепа. Если бы было желательно, в силу каких бы то ни было соображений, сделать так, чтобы $\varphi = 0$, т. е. чтобы ось мины стояла вертикально, то надо взять c так, чтобы было

$$c + a = 0$$

т. е. чтобы минреп был закреплен в центре *величины* мины, нагрузка которой должна быть такова, чтобы ее *центр тяжести* лежал *ниже* центра величины.

Такое крепление минрепа можно, например, осуществить, взяв его за средину скобы, свободно вращающейся на цапфах, ось коих проходит через центр фигуры мины.

§ **2.** Перейдем теперь к рассмотрению формы, принимаемой минрепом.

Пусть M есть какая-либо точка минрепа, координаты ее обозначим через x и z, пусть M_1 есть другая бесконечно близкая к M точка минрепа (фиг. 1).

На элемент минрепа MM_1 действуют следующие силы:

1) T — натяжение минрепа в точке M;
2) T_1 — натяжение минрепа в точке M_1;
3) вес элемента MM_1, равный $p \cdot ds$;
4) сопротивление воды, равное $k \cdot \sin^2 \alpha \cdot ds$.

Сила T направлена по касательной в точке M, сила T_1 — по касательной в точке M_1, вес элемента MM_1, очевидно, направлен вертикально вниз, т. е. параллельно оси z, и сопротивление воды направлено по нормали к рассматриваемому элементу, через p обозначен вес погонного метра минрепа и через k некоторый коэффициент, пропорциональный диаметру минрепа и квадрату скорости течения, представляющий собою величину сопротивления на погонный метр минрепа, когда его направление перпендикулярно к направлению скорости течения, так что вообще

$$k = nv^2 d$$

Численная величина n будет приведена далее.

Наконец, через α обозначено наклонение касательной в точке M к оси x.

При сделанных обозначениях имеем следующие уравнения, выражающие условия равновесия рассматриваемого элемента

$$T_1 \cos\alpha_1 - T\cos\alpha - k\,ds\sin^3\alpha = 0 \tag{11}$$

$$T_1 \sin\alpha_1 - T\sin\alpha + k\,ds\sin^2\alpha\cos\alpha + p\,ds = 0 \tag{12}$$

или, иначе,

$$d(T\cos\alpha) - k\sin^3\alpha\,ds = 0 \tag{11'}$$

$$d(T\sin\alpha) + k\sin^2\alpha\cos\alpha\,ds + p\,ds = 0 \tag{12'}$$

По разделении на ds, обозначив

$$\frac{dT}{ds} = T' \quad \text{и} \quad \frac{d\alpha}{ds} = \alpha'$$

напишем предыдущие два уравнения так

$$\left.\begin{aligned} T'\cos\alpha - T\sin\alpha\cdot\alpha' - k\sin^3\alpha = 0 \\ T'\sin\alpha + T\cos\alpha\cdot\alpha' + k\sin^2\alpha\cos\alpha + p = 0 \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Откуда следует

$$\left.\begin{aligned} T' + p\sin\alpha = 0 \\ T\alpha' + k\sin^2\alpha + p\cos\alpha = 0 \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

и

Замечая, что

$$\sin\alpha = \frac{dz}{ds}$$

из первого из предыдущих уравнений имеем

$$\frac{dT}{ds} + p\frac{dz}{ds} = 0$$

или, по интегрировании, и помня, что при $s=0$ (для точки A) $T=T_0$ и $z=0$, получаем

$$T + ps = T_0$$

или, иначе,

$$T = T_0 - pz \tag{15}$$

Этим уравнением определяется натяжение минрепа в каждой его точке. Второе из уравнений (14) дает

$$\alpha' = -\frac{p\cos\alpha + k\sin^2\alpha}{T} = \frac{d\alpha}{ds} \tag{16}$$

а так как из первого из уравнений (14) следует

$$T' = \frac{dT}{ds} = -p\sin\alpha$$

то

$$ds = -\frac{dT}{p\sin\alpha} \tag{14'}$$

и уравнение (16) напишется так

$$\frac{p\cos\alpha + k\sin^2\alpha}{T} = p\sin\alpha\frac{d\alpha}{dT}$$

откуда получаем

$$\frac{dT}{T} = \frac{p\sin\alpha}{p\cos\alpha + k\sin^2\alpha}d\alpha$$

и, следовательно,

$$\log T + C = p\int\frac{\sin\alpha\ d\alpha}{p\cos\alpha + k\sin^2\alpha} \tag{17}$$

Причем постоянная произвольная C определяется из того условия, что для точки A, где $\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$, натяжение минрепа $T = T_0$.

Нетрудно видеть, что входящая в формулу (17) квадратура выполняется в конечном виде.

В самом деле, обозначая этот интеграл через I, имеем

$$I = p\int\frac{\sin\alpha\,d\alpha}{p\cos\alpha + k\sin^2\alpha} = \frac{p}{k}\int\frac{d\cos\alpha}{\cos^2\alpha - \frac{p}{k}\cos\alpha - 1} =$$

$$= \frac{p}{k}\int\frac{d\cos\alpha}{\left(\cos\alpha - \frac{p}{2k}\right)^2 - \left(1 + \frac{p^2}{4k^2}\right)}$$

или, положив для краткости

$$\left.\begin{aligned} &\frac{p}{2k} = n \quad \text{и} \quad 1 + \frac{p^2}{4k^2} = 1 + n^2 = h^2 \\ &\text{и} \\ &u = \cos\alpha - n \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

имеем

$$I = 2n\int\frac{du}{u^2 - h^2} = \frac{n}{h}\log\frac{h-u}{h+u}$$

Итак, уравнение (17) принимает вид

$$\log T + C = \frac{n}{h}\log\frac{h-u}{h+u} \tag{19}$$

При

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$$

будет

$$u = \cos\alpha - n = \sin\theta - n = u_0$$

и мы получим для определения C

$$\log T_0 + C = \frac{n}{h}\log\frac{h-u_0}{h+u_0}$$

и затем

$$\log \frac{T}{T_0} = \frac{n}{h} \log \left(\frac{h-u}{h-u_0} \cdot \frac{u_0+h}{u+h} \right) \tag{20}$$

или, иначе,

$$\log \frac{T}{T_0} = \frac{p}{\sqrt{p^2+4k^2}} \log \left(\frac{h+n-\cos\alpha}{h-n+\cos\alpha} \cdot \frac{h-n+\sin\theta}{h+n-\sin\theta} \right)$$

Откуда получаем

$$T = BT_0 \left(\frac{h+n-\cos\alpha}{h-n+\cos\alpha} \right)^A \tag{21}$$

где через A и B обозначены следующие величины

$$A = \frac{p}{\sqrt{4k^2+p^2}} \quad \text{и} \quad B = \left(\frac{h-n+\sin\theta}{h+n-\sin\theta} \right)^A \tag{22}$$

Из уравнения (21) имеем

$$-dT = AB\,T_0 \left(\frac{h+n-\cos\alpha}{h-n+\cos\alpha} \right)^{A-1} \frac{2h\sin\alpha\, d\alpha}{(h-n+\cos\alpha)^2}$$

а так как в силу уравнения (14′)

$$-\frac{dT}{p\sin\alpha} = ds$$

то предыдущее уравнение напишется так

$$ds = \frac{2h}{p} A\,B\,T_0 \frac{(h+n-\cos\alpha)^{A-1}}{(h-n+\cos\alpha)^{A+1}} d\alpha \tag{23}$$

а так как при $\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$, $s = 0$, то будет

$$s = \frac{2h}{p} A\,B\,T_0 \int_{\frac{\pi}{2}-\theta}^{\alpha} \frac{(h+n-\cos\alpha)^{A-1}}{(h-n+\cos\alpha)^{A+1}} d\alpha \tag{24}$$

Так как число A вообще не есть целое, а, напротив, даже несоизмеримое, то входящий в уравнение (24) интеграл в конечном виде не выражается и может быть исчисляем лишь по приближенным формулам, служащим для вычисления определенных интегралов.

Наконец заметив, что

$$\cos\alpha = \frac{dx}{ds}$$

получим в силу формулы (23) и того условия, что при

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta, \quad x = 0$$

$$x = \frac{2h}{p} A\;B\;T_0 \int_{\frac{\pi}{2}-\theta}^{\alpha} \frac{(h+n-\cos\alpha)^{A-1}}{(h-n+\cos\alpha)^{A+1}} \cos\alpha\, d\alpha \tag{25}$$

Уравнения (15), (21), (24) и (25) и дают полное решение вопроса о форме минрепа.

§ 3. Для практических применений уравнения (21), (24) и (25) слишком сложны и представляют лишь тот интерес, что показывают теоретическую возможность полного решения задачи; но зато на практике имеет место другое обстоятельство, дающее возможность получить крайне простое и для некоторых суждений достаточно точное решение.

Это обстоятельство состоит в том, что вес минрепа составляет лишь малую долю от его натяжения, зависящего главным образом от плавучести мины и сопротивления ее течению.

Поясним это обстоятельство на примере.

Положим, что скорость течения 4 узла, диаметр минрепа возьмем в 9 мм, коэффициент n в формуле

$$k = nv^2 d$$

будет: $n = 12.5$,[1] если v выражать в узлах и d в метрах, так что

$$k = 12.5 \cdot 4^2 \cdot 0.009 = 1.84 \text{ кг}$$

Вес погонного метра минрепа составляет около 0.2 кг, таким образом будет

$$p = 0.20 \text{ кг}$$
$$k = 1.84 \text{ кг}$$
$$T_0 = \sqrt{(37.5)^2 + 57^2} = 69$$
$$\theta = 33^\circ 3$$
$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \theta = 56^\circ 7$$

При длине вытравленного минрепа в 100 м величина

$$pz < 0.20 \cdot 100 \cdot \sin 56^\circ 7 < 16.5$$

Следовательно, величина натяжения T заключается между такими пределами

$$69 > T > 52.5$$

Значит, взяв

$$T = 61 \text{ кг}$$

мы можем в первом приближении считать величину T постоянной, что равносильно тому, чтобы положить $p = 0$ и $T' = 0$ во втором уравнении (13), которое тогда будет

$$T\,d\alpha = -k \sin^2 \alpha\, ds$$

---

[1] Величина коэффициента n выражается такою приближенною формулою:

$$n = \frac{1000}{2g} \cdot \frac{1}{4}$$

причем $g = 9.82$, так что n приблизительно равно 12.5.

Откуда

$$-\frac{d\alpha}{\sin^2\alpha}=\frac{k}{T}\,ds$$

и по интегрировании

$$\operatorname{cotg}\alpha-\operatorname{cotg}\alpha_0=\frac{k}{T}\,s \tag{26}$$

Затем из уравнения

$$dz=\sin\alpha\cdot ds$$

следует при нашем предположении такое

$$dz=-\frac{T}{k}\,\frac{d\alpha}{\sin\alpha} \tag{27}$$

Откуда по интегрировании получается

$$z=\frac{T}{k}\log\frac{\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}}{\operatorname{cotg}\frac{\alpha_0}{2}} \tag{27'}$$

Так в нашем примере будет

$$\operatorname{cotg}\alpha=\operatorname{cotg}56^\circ\!.7+\frac{1.84}{61}s$$

или

$$\operatorname{cotg}\alpha=0.6577+0.0302\,s \tag{26'}$$

Значит, в точке прикрепления минрепа к якорю ($s=100$ метров) будет

$$\operatorname{cotg}\alpha_1=0.6577+3.02=3.68$$
$$\alpha_1=15^\circ 10'$$

Само собою разумеется, что в формуле (27') знак log означает натуральный логарифм, следовательно, чтобы пользоваться обыкновенными логарифмами, надо эту формулу написать так

$$z=\frac{T}{k}\cdot 2.3026\cdot \operatorname{Log}\frac{\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}}{\operatorname{cotg}\frac{\alpha_0}{2}} \tag{27''}$$

или в нашем случае

$$z=\frac{61}{1.84}\,2.3026\,\operatorname{Log}\frac{\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}}{\operatorname{cotg}\frac{\alpha_0}{2}}=76.4\,\operatorname{Log}\frac{\operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}}{\operatorname{cotg}\frac{\alpha_0}{2}}$$

Следовательно, чтобы найти вертикальное расстояние мины от дна, надо в этой формуле сделать

$$\alpha_0=56^\circ\!.7$$

и

$$\alpha = 15^\circ 10' = \alpha_1$$

Получим

$$z = 76.4\,(0.8757 - 0.2582) = 46.5 \text{ м}$$

Найдя эту величину z_1, мы можем получить более близкое решение. В самом деле

$$pz_1 = 9 \text{ кг}$$

значит, величина T будет заключаться между пределами

$$69 > T > 60$$

поэтому можно взять

$$T = 65 \text{ кг}$$

тогда

$$\frac{T}{k} = 35.3; \quad 2.3026 \cdot \frac{T}{k} = 81.5; \quad \frac{k}{T} = 0.0283$$

Значит будет

$$\operatorname{cotg}\alpha_1 = 0{,}6577 + 2.83 = 3.49$$

$$\alpha_1 = 16^\circ 0'$$

$$z = 81.5\,(0.8522 - 0.2682) = 47.5 \text{ м}$$

Из уравнений (27) и соотношения

$$\frac{dz}{dx} = \operatorname{tg}\alpha$$

следует

$$x = \frac{T}{k}(\operatorname{cosec}\alpha - \operatorname{cosec}\alpha_0) \tag{28}$$

делая в этой формуле $\alpha = \alpha_1$, получим горизонтальное расстояние мины от своего якоря.

В нашем примере оно будет

$$x_1 = 35.3\,(3.628 - 1.198) = 86 \text{ м}$$

Уравнения (28) и (27″) дают возможность вычертить форму минрепа.

§ 4. Предыдущее приближенное решение хотя и не дает точного погружения мины, но дает возможность оценить влияние изменения скорости течения на глубину погружения мины.

Положим, например, что скорость течения изменилась на $\frac{1}{2}$ узла и вместо 4 узлов стала $4\frac{1}{2}$ узла.

Тогда, применяя изложенные в этой заметке формулы, получим

$$S = 47.5 \text{ кг}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{47.5}{57} = 0.834 + \operatorname{cotg}\alpha_0$$

$$\alpha_0 = 51^\circ 10'$$

$$k = 2.28$$

$$T_0 = \sqrt{57^2 + 47.5^2} = 74; \quad \text{берем} \quad T = 70$$

$$\frac{T}{k} = 30.7; \quad \frac{T}{k} \cdot 2.3026 = 70.7; \quad \frac{k}{T} = 0.0326$$

$$\operatorname{cotg}\alpha = 0.834 + 3\,26 = 4.09$$

$$\alpha_1 = 13^\circ 45'$$

$$z_1 = 70.7\,(\log \operatorname{cotg} 6^\circ 58' - \log \operatorname{cotg} 25^\circ 35') = 41.8 \text{ м}$$

При скорости же течения в 4 узла расстояние мины от дна было 47.5 м, т. е. погружение мины от изменения скорости течения на $\frac{1}{2}$ узла, с 4 до $4\frac{1}{2}$ узлов, изменилось почти на 6 м, т. е. на 20 футов.

Этот результат показывает, сколь чувствительна шаровая мина к изменению скорости течения, когда она поставлена на большой глубине.

§ 5. Рассмотрев аналитическое решение поставленной задачи, покажем графическое ее решение, которое может быть выполнено весьма просто, благодаря тому, что сила, действующая на верхний конец минрепа, *вполне* известна.

Положим, что кривая AB (фиг. 2) представляет форму равновесия минрепа. Разделим дугу AB на несколько равных частей Aa_1, a_1a_2, a_2a_3, ... настолько малых, чтобы можно было с тою точностью, с которою выполняется чертеж, и которая только и нужна для практики, заменить каждую из частей кривой ее хордою. Таким образом, вместо кривой AB, мы получим вписанную в нее ломаную, которая при достаточном числе элементов будет сколь угодно близка к нашей кривой.

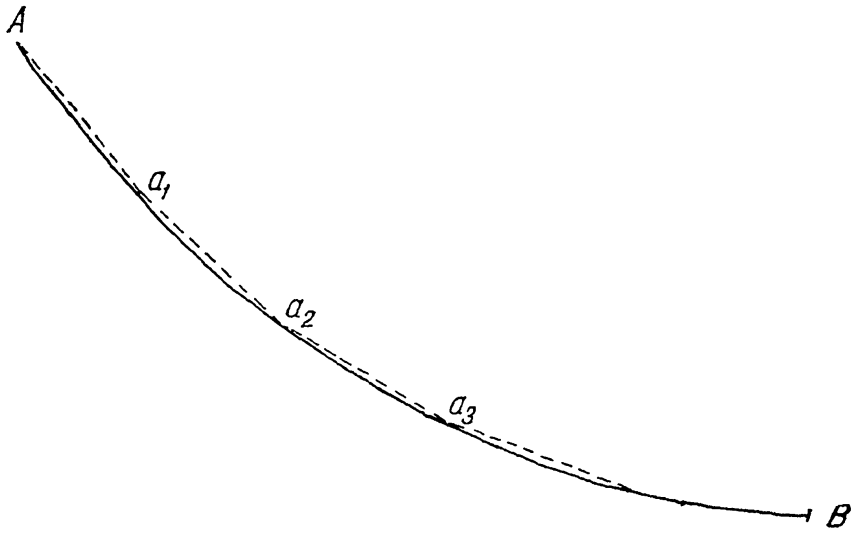
Очевидно, что если бы мы сумели построить такую ломаную, то мы и получили бы решение нашей задачи.

Чтобы это выполнить, стоит только обратить внимание на механический смысл замены кривой AB (фиг. 2) соответствующей ей ломаной; очевидно, что этот смысл таков: надо вообразить, что минреп заменен цепью, составленной из отдельных прутьев, соединенных шарнирами, причем вес погонного метра этих прутьев такой же, как и вес минрепа, и диаметр их равен диаметру минрепа, — иными словами, что сопротивление воды на погонный метр прута такое же, как и на погонный метр минрепа.

Возьмем один из элементов нашей цепи, например элемент $a_k a_{k+1}$ (фиг. 3), и посмотрим, какие силы на него действуют.

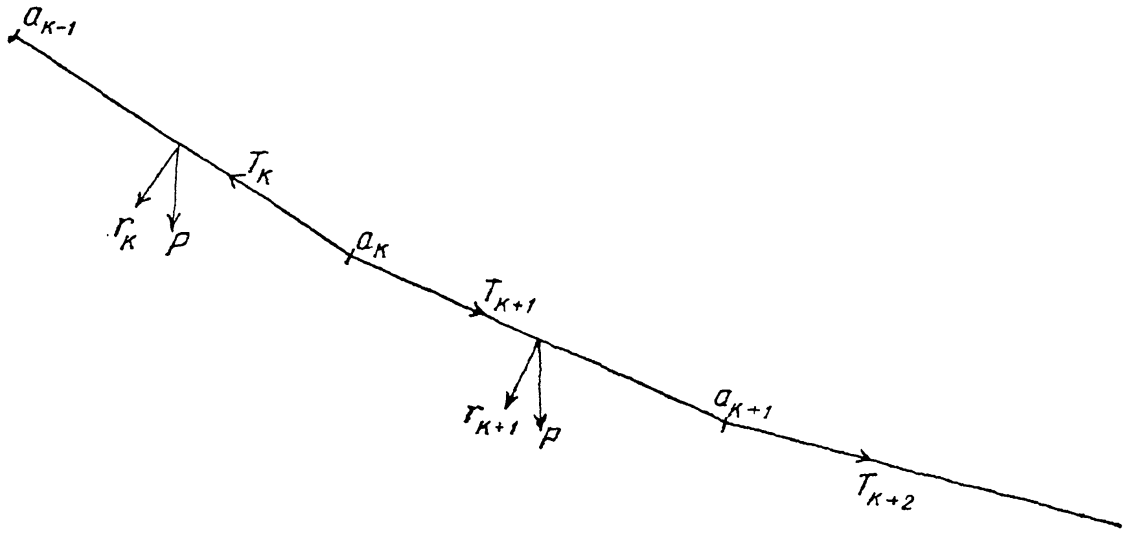
Эти силы следующие:

1) натяжение T_k элемента, лежащего слева от рассматриваемого, приложенное в узле a_k и совпадающее с направлением предыдущего звена $a_{k-1}\,a_k$;



Фиг. 2.

2) сопротивление воды r_{k+1}, приложенное посредине элемента, направленное перпендикулярно к нему и пропорциональное $\sin^2\alpha_{k+1}$, где α_{k+1} есть наклонение рассматриваемого элемента к горизонту;



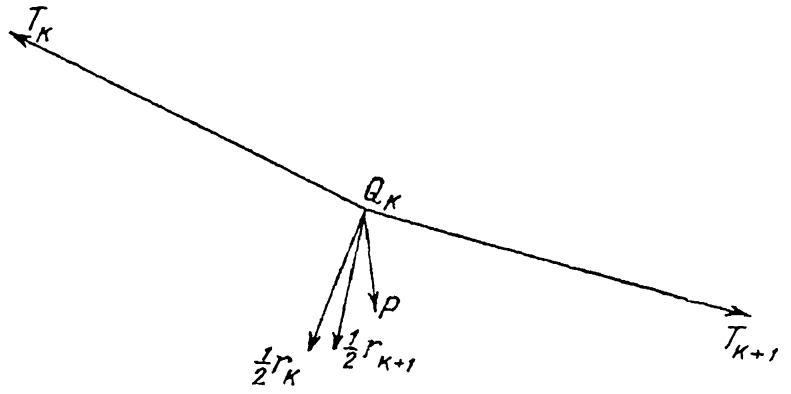
Фиг. 3.

3) вес элемента p, направленный вертикально вниз, одинаковый для всех звеньев;

4) натяжение T_{k+2} элемента, лежащего справа от рассматриваемого, приложенное в узле a_{k+1} и совпадающее с направлением последующего звена $a_{k+1}\,a_{k+2}$.

Очевидно, что равновесие нашей цепи не нарушится, если мы каждую из сил r и p разложим на две, им соответственно параллельные $\frac{r}{2}$ и $\frac{p}{2}$, приложенные в узлах a_k и a_{k+1}; тогда нам придется иметь дело лишь с силами, приложенными в узлах, при равновесии же всей системы и каждый из узлов находится в равновесии, и обратно.

Рассмотрим теперь *все* силы, приложенные в узле a_k (фиг. 4), при высказанном выше условии.



Фиг. 4.

Эти силы суть

$$T_k, \quad \frac{1}{2}r_k, \quad \frac{1}{2}p$$

происходящие от элемента $a_{k-1}a_k$;

$$T_{k+1}, \quad \frac{1}{2}r_{k+1}, \quad \frac{1}{2}p$$

происходящие от элемента $a_k a_{k+1}$.

Причем сила $\frac{1}{2}r$ перпендикулярна к T_k, и сила $\frac{1}{2}r_{k+1}$ перпендикулярна к T_{k+1}.

Ввиду того, что угол между направлениями двух последовательных звеньев весьма малый, можно равнодействующую сил $\frac{1}{2}r_k$ и $\frac{1}{2}r_{k+1}$ заменить суммою этих двух сил, направленной по перпендикуляру к T_k, а так как длина обоих звеньев одинакова, то можно считать в первом приближении $r_{k+1} = r_k$ и, следовательно, равнодействующую сил $\frac{1}{2}r_k$ и $\frac{1}{2}r_{k+1}$ заменить просто силою r_k.

Такая замена доставит возможность по данным, относящимся к узлу с номером k, находить величину T_{k+1}, т. е. и направление звена $a_k a_{k+1}$, а значит и силы, действующие на узел с номером $(k+1)$, и таким образом, зная силы, приложенные в точке A, построить всю цепь.

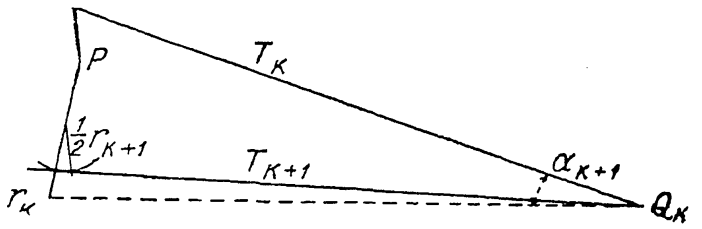
Итак, выполним то построение, которое служит для определения T_{k+1}; ясно, что эта сила по величине и направлению представится замыкающей ломаной, построенной на величинах сил T_k, r_k и p.

Если бы оказалось, что направление силы T_{k+1} чувствительно разнится от направления силы T_k, то, приняв это направление за первое приближение, строим рядом второй исправленный чертеж, в котором рассчитываем величину r_{k+1} соответственно направлению силы T_{k+1}, т. е. углу α_{k+1} (фиг. 5), и строим замыкающую сил

$$T_k, \quad \frac{1}{2}r_k, \quad p \text{ и } \frac{1}{2}r_{k+1}$$

Это второе приближение уже дальнейших исправлений обыкновенно не потребует.

Повторяем то же построение для узла a_{k+1} и т. д.



Фиг. 5.

После нахождения направления последовательных звеньев, остается только построить ломаную с заданною длиною сторон, каждая из которых имеет вышеуказанное направление, и мы получим искомую форму минрепа.

Остается только показать, каким образом выполнить описанное построение без излишней затраты труда и времени.

Для этого покажем прежде всего, как определять графически силу r_k по величине и направлению, когда известен угол наклонения α_k соответствующего элемента.

В § 3 показано, что на 1 погонный метр эта сила выражается формулою

$$f = nv^2 d \sin^2 \alpha_k$$

Значит, если длина звена есть l метров, то будет

$$r_k = nv^2 dl \sin^2 \alpha_k = q \sin^2 \alpha_k = \frac{1}{2} q (1 - \cos 2\alpha_k) \qquad (29)$$

где

$$q = nv^2 l d$$

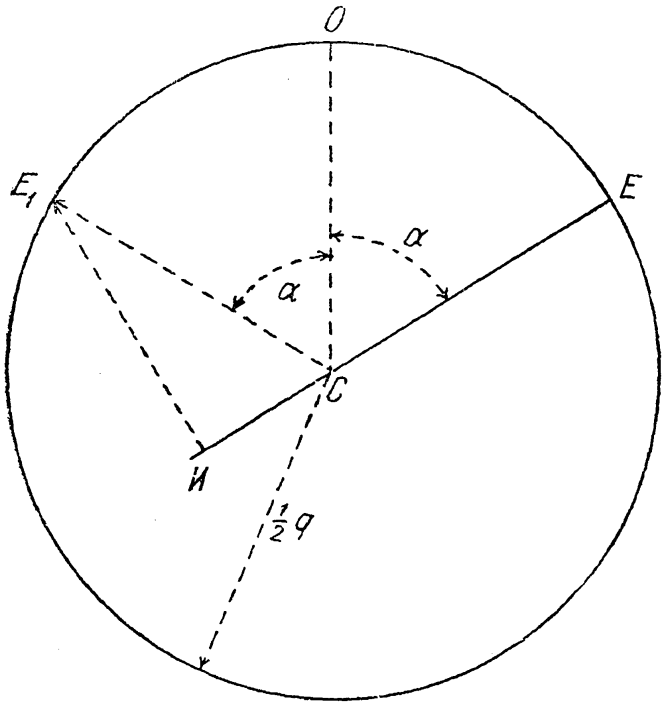
Отсюда следует такое построение: из произвольной точки C, как из центра, радиусом, равным $\frac{1}{2}q$ (в принятом масштабе) описываем круг, проводим вертикальный радиус OC (фиг. 6) и от точки O вправо и влево откладываем углы

$$\angle OCE = \angle OCE_1 = \alpha_k$$

Опустив перпендикуляр $E_1 N$, получим длину EN, которая по величине и направлению представит силу r_k.

Обратив внимание на это построение и заметив, что в том случае, когда желательно иметь только величину силы r_k, то безразлично, где брать точку O, мы строим следующую диаграмму.

Берем произвольную точку C (фиг. 7) и, отложив по масштабу, например 5 мм = 1 кг, вертикально вверх длину CQ_1, представляющую силу Q_1, и от точки Q_1 горизонтально влево длину $Q_1 T_0$, представляющую силу S, и соединяем точку C с точкою T_0, мы получили длину CT_0, представляющую по величине и направлению силу T_0. Проведя через точку C прямую CO, мы получим и угол $\alpha_0 = OCT_0$.



Фиг. 6.

Чтобы на этом же чертеже получить и силу r, описываем из точки C, как из центра, круг радиусом $\frac{1}{2}q$ и будем на нем делать описанное выше построение, имея непосредственно и углы α, как только определено направление силы T.

От точки T_0 откладываем вниз длину $T_0 b_1 = p$ по избранному масштабу, затем выполнив на нижней части диаграммы определение величины $r_1 = E_0 N_0$, откладываем длину $b_1 c_1 = \frac{1}{2} r_1 = \frac{1}{2} E_0 N_0$ по перпендикуляру к T_0 и получив точку c_1, соединяем ее с точкою C, получаем первое приближение к направлению силы T_1; не проводя этой прямой, отмечаем лишь ее пересечение e_1 с кругом, угол OCe_1 — есть приближенное значение угла α_1; строим величину $r_1 = E_1 N_1$, соответствующую этому углу, и описываем радиусом, равным $\frac{1}{2} E_1 N_1$, из точки b_1, как из центра, круг и проводим к нему касательную CT_1. Так как эта прямая пересекает круг, служащий для определения величины r_1, так близко к точке e_1, что чертежом в принятом масштабе разницы в величине r_1 определить нельзя, то полученная точка T_1 дальнейшего исправления не требует, и направление CT_1 и есть направление первого звена, и величина CT_1 натяжение его.

Чтобы получить направление второго звена, откладываем от точки T_1 длину $T_1 b_2 = p$ в принятом масштабе, через полученную точку проводим

перпендикуляр к линии CT_1 и откладываем по нему длину $b_2 c_2 = r_1 = E_1 N_1$, и не проводя прямой Cc_2, отмечаем точку ее пересечения с кругом радиуса $\frac{1}{2} q$, и строим величину r_2, соответствующую направлению Cc_2, берем длину равную $\frac{1}{2} r_2$ и, описав этим радиусом из середины d_2 прямой $b_2 c_2$ круг, проводим к нему касательную CT_2, которая и даст направление и натяжение второго звена, и продолжаем таким же образом далее.

Когда мы в нашем примере дошли до 6-го узла, то величина r стала уже столь малою, что дальше можно было воображать звенья длиною вдвое больше нежели предыдущие.

Построение точки T_8 и T_{10} на основании предыдущего не требует пояснений; надо только иметь в виду, что величины r_8 и r_{10}, получаемые по кругу радиуса $\frac{1}{2} q$, будут равны половине истинных.

Чтобы получить затем форму минрепа, проводим через точку T_0 прямую $T_0 a_1$, параллельную прямой $T_1 C$, и откладываем по ней длину $T_0 a_1 = l$ длине звена в принятом масштабе, получаем первый узел a_1, через полученную точку a_1 проводим прямую параллельно $T_2 C$ и откладываем по ней длину, равную l — получаем второй узел a_2, и продолжаем так, пока не дойдем до последнего узла, в нашем случае 10-го, представляющего точку прикрепления минрепа к якорю.

§ 6. Само собою разумеется, что описанный приближенный процесс может быть воспроизведен не только построением, но и вычислением, совершенно подобно тому, как можно вести прокладку или счисление.

Это вычисление может быть также производимо весьма быстро и просто; стоит только его расположить в должном порядке и составить надлежащую схему. Для этого обратимся к узлу с произвольным номером k и, заметив, что все силы, к нему приложенные, находятся в равновесии, получим, обозначая через X_k и Z_k горизонтальную и вертикальную проекции силы T_k, следующие формулы

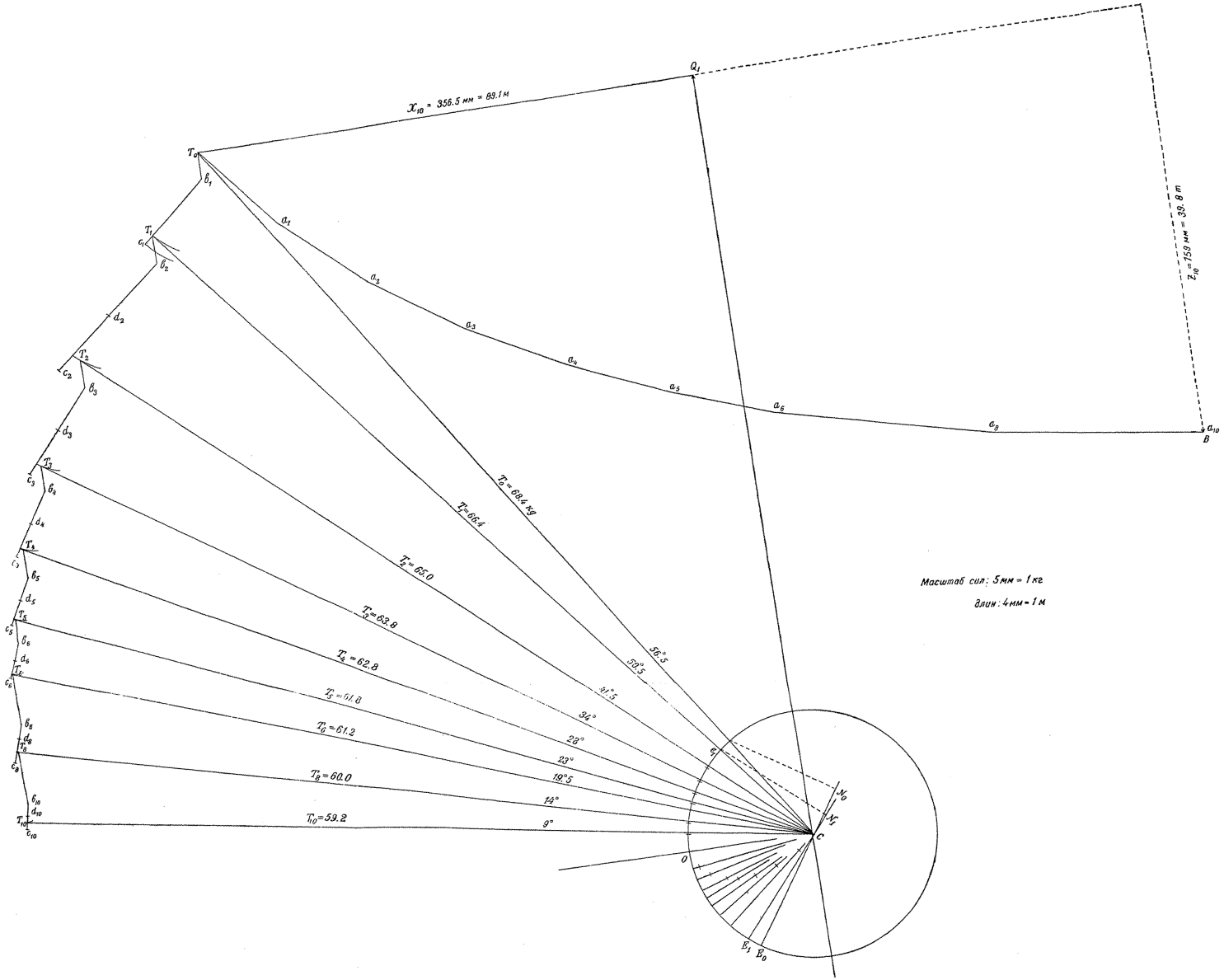
$$\left.\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + \tfrac{1}{2} r_k \sin \alpha_k + \tfrac{1}{2} r_{k+1} \sin \alpha_{k+1} \\ Z_{k+1} &= Z_k - p - \tfrac{1}{2} r_k \cos \alpha_k - \tfrac{1}{2} r_{k+1} \cos \alpha_{k+1} \\ \operatorname{tg} \alpha_{k+1} &= \frac{Z_{k+1}}{X_{k+1}} \end{aligned}\right\} \qquad (30)$$

Эти три уравнения вместе с уравнением

$$r_{k+1} = q \sin^2 \alpha_{k+1}$$

и должны бы служить для нахождения величин X_{k+1}, Z_{k+1} и α_{k+1}, когда даны X_k, Z_k и α_k.

Как видно, *точное* их решение было бы весьма затруднительно, но так как мы взяли нарочно элементы цепи достаточно малыми, то к реше-



А. Н. Крылов. Собр. тр., т. IX, ч. 2.

Фиг. 7.

нию этих уравнений применим способ последовательных приближений, взяв для первого приближения

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k$$

тогда первые два уравнения дают

$$\left.\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + r_k \sin \alpha_k \\ Z_{k+1} &= Z_k - p - r_k \cos \alpha_k \end{aligned}\right\} \qquad (31)$$

Определив таким образом X_{k+1} и Z_{k+1}, находим по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \frac{Z_{k+1}}{X_{k+1}}$$

приближенное значение угла α_{k+1}, по нему находим r_{k+1} и затем, по формуле (30), — исправленные значения X_{k+1} и Z_{k+1}, по которым затем находим исправленное значение угла α_{k+1}, с которым можно было бы повторить тот же процесс, пока два последовательных приближения не будут чувствительно друг от друга разниться, но обыкновенно достаточно и этого первого исправленного значения угла α_{k+1}.

Этот процесс и надо воспроизвести в схеме.

Эта схема будет следующая

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII
k № узла	$X_k = \text{XVI}$	$Z_k = \text{XVII}$	$\operatorname{tg}\alpha_k = \frac{\text{III}}{\text{II}}$	α_k	$r_k = q \sin^2 \alpha_k$	$r_k \sin \alpha_k$	$r_k \cos \alpha_k$	$X_{k+1} = \text{II} + \text{VII}$	$Z_{k+1} = \text{III} - p - \text{VIII}$	$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \frac{Z_{k+1}}{X_{k+1}}$	α_{k+1}	$r_{k+1} = q \sin^2 \alpha_{k+1}$	$\frac{1}{2} r_{k+1} \sin \alpha_{k+1}$	$\frac{1}{2} r_{k+1} \cos \alpha_{k+1}$	$X_{k+1} = \text{II} + \frac{1}{2}\text{VII} + \frac{1}{2}\text{XIV}$	$Z_{k+1} = \text{X} + \frac{1}{2}\text{VIII} - \frac{1}{2}\text{XV}$
0	Исправленные значения по второму приближению			Первое приближение								Второе приближение				
1																
2																
3																
.																
.																
.																

Вычисление по этой схеме надо производить по логарифмической линейке, нахождение же углов — по таблицам натуральных тангенсов или по той же линейке.

Когда величины α_k вычислены, то координаты узлов найдутся по формулам

$$\left.\begin{aligned} x_k &= l(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3 + \ldots + \cos\alpha_k) \\ z_k &= l(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2 + \sin\alpha_3 + \ldots + \sin\alpha_k) \end{aligned}\right\} \qquad (32)$$

где l — есть длина одного звена.

Вычисление по этим формулам производится по такой схеме:

I	II	III	IV	V	VI
№ узла k	Наклонение звена α_k	$l\cos\alpha_k$	$l\sin\alpha_k$	Сумма последовательных чисел столбца III сверху x_k	Сумма последовательных чисел столбца IV сверху z_k
1	α_1				
2	α_2				
3	α_3				
4	α_4				

§ 7. Для пояснения как графического, так и последней части аналитического процесса обратимся к тому примеру, для которого у нас дано приближенное решение в § 4, причем мы пренебрегали весом минрепа, чего теперь делать не будем.

Мы имели при четырех узлах течения

$$\begin{aligned} Q_1 &= 57 \text{ кг} \\ S &= 37.5 \text{ кг} \\ r &= 1.84 \cdot \sin^2\alpha \text{ кг на 1 погонный метр} \\ p &= 0.20 \text{ кг на 1 погонный метр} \end{aligned}$$

Возьмем звенья по 10 м, тогда будет на звено

$$\begin{aligned} r_k &= 18.4 \cdot \sin^2\alpha_k = 9.2(1 - \cos 2\alpha_k) \\ p &= 2.0 \end{aligned} \qquad (29)$$

Это построение выполнено на фиг. 7, исполненной в масштабе 5 мм = 1 кг для сил и 4 мм = 1 м для построения формы минрепа.

Самое построение, в особенности та часть его, где определяются натяжения и направления последовательных звеньев, делается настолько быстро и просто, что этому графическому решению надо отдать предпочтение перед аналитическим.

Так как при проведении прямых, параллельных лучам CT, которое необходимо для получения верхней части нашего чертежа, изображающего

форму минрепа, легко сделать ошибку, то полезно эту часть построения проверить и расчетом.

Для этого надо с чертежа снять углы, составляемые последовательными звеньями, и по формуле (32) вычислить координаты узлов по следующей схеме:

№ узла	Наклонение звена α_{k-1} α_k α_k	$l\cos\alpha_k$	$l\sin\alpha_k$	$x_k = \sum l\cos\alpha_k$	$z_k = \sum l\sin\alpha_k$
0	—	—	—	0	0
1	50°5	6.36	7.72	6.36	7.72
2	41.5	7.60	6.50	13.96	14.22
3	34.0	8.29	5.59	22.25	19.81
4	28.0	8.83	4.69	31.03	24.40
5	23.5	9.18	3.99	40.26	28.49
6	19.5	9.43	3.34	49.69	31.83
8	14.0	19.40	4.84	69.06	36.67
10	9.0	19.76	3.12	88.85	39.79
		88.85	39.79		

При этом надо обратить внимание и на длину звеньев, когда, например, как в нашем случае, ближайшие к якорю взяты вдвое длиннее остальных, удвоив соответствующие члены.

Чертеж дал координаты

$$x_{10} = 89.1 \text{ м}$$
$$z_{10} = 39.8 \text{ м}$$

Согласие, как видно из таблички, вполне удовлетворительное.

§ 8. Заметим в заключение этой статьи, что описанное построение может быть обобщено так, что оно становится применимым для какого угодно закона сопротивления воды на минреп, и даже для случая какого угодно распределения скоростей течения по глубине; сущность способа — последовательное приближение для каждого узла в отдельности, сохранится, изменится лишь прием определения величины r, когда известно направление и положение соответствующего звена.

ПОВЕРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ПОСТАНОВКЕ КЕССОНА МОСТА ИМЕНИ ВОЛОДАРСКОГО[1]

В начале июля 1933 г. я был приглашен Строительством моста имени Володарского осмотреть все подготовительные устройства к постановке кессона и произвести поверительные расчеты, сюда относящиеся, независимо от расчетов инж. Бронникова.

Согласно просьбе Мостотреста ввиду отсутствия подобных расчетов, Издательство Академии Наук включило записку инж. Бронникова и мою в серию технических изданий Академии, ибо в ближайшие годы предстоит постройка многих мостов на мощных и глубоководных реках.

1. Термины, относящиеся к тросам и цепям

Со времен Петра I на военном флоте установлена определенная терминология, которой я и буду придерживаться.

Всякая веревка на корабле называется *трос*.

В настоящее время трос бывает: а) *пеньковый*, смоленый и белый б) *манильский*, белый из манильской конопли, в) *травяной* — из алжирской травы, в большом употреблении для швартовов на коммерческих судах бассейна Средиземного моря, г) *проволочный* — в прежнее время железный, теперь стальной из специальной стали высокого сопротивления.

Толщина троса измеряется по *окружности* и выражается в английских дюймах. Лишь для стального проволочного троса иногда дается его диаметр в миллиметрах.

Трос мерою по окружности меньше $1\frac{1}{2}$ дюймов зовется *линь*. Трос мерою свыше 3 дюймов и до 9 дюймов зовется *перлинь*. Трос мерою свыше 9 дюймов и до 12 дюймов зовется *кабельтов*; трос мерою свыше 12 дюймов зовется *канат*.

На больших военных парусных судах до 1830-х годов якорные канаты были пеньковые, толщина их доходила до 26 дюймов, т. е. диаметр

---

[1] Впервые издано отдельной брошюрой (совместно со статьей Д. В. Бронникова) Академией Наук СССР в 1934 г.

до 8 дюймов. С 1830-х годов пеньковые якорные канаты заменены железными цепями, но преемственно за якорными цепями сохранилось название *„якорные канаты“*.

Толщина якорных канатов и всякого рода цепей измеряется *по диаметру железа звена* и выражается или в английских дюймах, или в миллиметрах.

Всякая тумба на судне, за которую крепят трос или цепь, называется *кнехт*. Совокупность двух соединенных между собою кнехтов называется *битенг*.

На деревянных судах кнехты пропускаются сквозь палубу и крепятся нижними концами к днищевому набору судна.

То место, где кнехт проходит сквозь палубу, называется *пяртнерс* кнехта; нижний конец, которым кнехт закреплен к набору судна, называется *степс*.

Эти термины приведены здесь для удобства дальнейшего изложения, чтобы неправильное истолкование термина не влекло за собою неправильного толкования сущности дела.

2. Крепость тросов и цепей

В справочниках по судостроению приводятся таблицы крепости тросов и цепей и их веса на погонный фут или метр. Таблицы эти основаны для пеньковых тросов на многовековой практике, для цепей приблизительно на столетней и для стального проволочного троса примерно на пятидесятилетней.

Здесь приводится краткое извлечение из этих таблиц, которые во всех флотах почти одинаковы.

Табл. 1 с достаточной точностью воспроизводится формулами

$$R = 0.275c^2 \qquad (1)$$

$$P = 5.7c^2 \qquad (2)$$

в которых R — рвущее усилие в тоннах, P — вес 100 м троса в килограммах, c — окружность троса в дюймах.

Белый трос примерно на 10% крепче смоленого, но скорее загнивает.

Стальной проволочный трос выделывается двух сортов: *обыкновенный* и *гибкий*, и тот и другой из специальной стали высокого сопротивления, но последний из стали более высокого качества.

Обыкновенный трос спускается из 6 прядей по 12 проволок в пряди, так что всего проволок 72. По центру каждой пряди и между прядями пеньковые сердечники.

Гибкий трос также шестипрядный, но в каждой пряди по 24 проволоки, так что всего проволок 144; между прядями и в каждой пряди пеньковый сердечник. Крепость гибкого троса на 33% и его вес на 20% больше обыкновенного.

Таблица 1

Смоленый пеньковый трос

Окружность (дюймы)	Рвущее усилие (тонны)	Вес 100 м (килограммы)	Окружность (дюймы)	Рвущее усилие (тонны)	Вес 100 м (килограммы)
3	2.50	50	6 1/2	12.00	243
3 1/2	3.30	63	7	13.80	281
4	4.40	89	7 1/2	15.80	322
4 1/2	5.50	112	8	17.90	365
5	6.80	139	8 1/2	20.20	411
5 1/2	8.20	167	9	22.70	461
6	10.30	208	10	27.90	568

Таблица 2

Обыкновенный стальной проволочный трос, шестипрядный по 12 проволок в пряди

Окружность троса (дюймы)	Диаметр троса (миллиметры)	Диаметр проволок (миллиметры)	Рвущее усилие (тонны)	Вес 100 м (килограммы)	Окружность троса (дюймы)	Диаметр троса (миллиметры)	Диаметр проволок (миллиметры)	Рвущее усилие (тонны)	Вес 100 м (килограммы)
1	8	0.5	1.5	19	3	25	1.60	16.5	159
1 1/4	10	0.65	2.6	26	3 1/4	27	1.75	20.0	191
1 1/2	12	0.80	4.2	40	3 1/2	29	1.90	23.8	225
1 3/4	14	0.90	5.4	50	3 3/4	31	2.00	26.5	249
2	16	1.05	7.3	69	4	33	2.15	30.8	282
2 1/4	18	1.20	9.7	90	4 1/2	37	2.40	39.0	358
2 1/2	20.5	1.35	12.5	113	5	41	2.70	50.0	453
2 3/4	23	1.50	14.4	140	5 1/2	45	2.90	57.5	523

Табл. 2 с достаточной точностью представляется формулами

$$R = 2c^3 \tag{3}$$

$$P = 18c^2 \tag{4}$$

где попрежнему R — рвущее усилие в тоннах, P — вес 100 м троса в килограммах, c — окружность троса в дюймах.

Таблица 3

Якорные канаты и вообще железные цепи с распорками

Диаметр железа звена (миллиметры)	Пробное усилие (тонны)	Рвущее усилие (тонны)	Вес 100 м (тонны)	Диаметр железа звена (миллиметры)	Пробное усилие (тонны)	Рвущее усилие (тонны)	Вес 100 м (тонны)
30	25.4	39.6	1.95	51	73.5	114.4	5.62
33	30.8	47.9	2.35	54	82.4	128.3	6.30
36	36.6	57.0	2.80	57	91.9	142.9	7.02
39	43.0	66.9	3.28	60	101.8	158.3	7.78
42	49.9	77.6	3.81	63	112.2	174.6	8.57
45	57.3	89.1	4.38	66	123.2	191.6	9.41
48	65.1	101.3	4.96	69	134.6	209.4	10.31

В метрических мерах пробная нагрузка R_0 составляет 18 кг на 1 мм^2 площади сечения звена, т. е. суммы площадей обоих сечений. Рвущее усилие R должно составлять не менее 1.56 пробного.

На основании этого пробное усилие для цепей определяется по формуле

$$R_0 = 28.27d^2 \tag{5}$$

Вес 100 м цепи исчисляется по формуле

$$P = 2.16d^3 \tag{6}$$

где d есть диаметр железа звена в миллиметрах, тогда R_0 и P получаются в килограммах.

Становых якорей на военных судах полагается два и запасный один. Канаты цепные по 225 м.

Для военных судов вес становых якорей и толщины соответствующих им канатов по германским нормам определяются табл. 4.

Эти таблицы приведены здесь, ибо в них заключаются основные данные для дальнейших расчетов и выработанные морскою практикою нормы.

Таблица 4

Веса становых якорей и толщина соответствующих им канатов на военных судах

Водоизмещение судна в полном грузу (тонны)	Вес якоря (тонны)	Толщина каната (миллиметры)	Водоизмещение судна в полном грузу (тонны)	Вес якоря (тонны)	Толщина каната (миллиметры)
От 1500 до 2500	2.0	42	От 9 000 до 10 500	5.0	60
„ 2500 „ 3500	2.5	45	„ 10 500 „ 12 500	5.5	60
„ 3500 „ 4500	3.0	48	„ 12 500 „ 15 000	6.0	63
„ 4500 „ 6000	3.5	51	„ 15 000 „ 18 500	6.5	66
„ 6000 „ 7500	4.0	54	„ 18 500 „ 22 500	7.0	69
„ 7500 „ 9000	4.5	57	„ 22 500 „ 27 000	7.5	72

3. Результаты осмотра подготовленного к постановке кессона

25 июля 1933 г. совместно с инженерным персоналом строительства и заведующим караваном мною произведен осмотр якорного, буксирного[1] и швартовного[2] устройства подготовленного к постановке кессона. Кессон *A* (фиг. 1) в полном погружении имеет размеры $40 \cdot 11 \cdot 15$ м $= 6600$ м^3. Он ошвартовлен между двумя деревянными речными баржами *B* и *C*, неизменно между собою скрепленными по носу и по корме железными двутавровыми балками и по бортам деревянным крановым устройством, перекрывающим кессон по всей длине.

На кессон подано и обведено вокруг него три пары (всего шесть концов) стальных проволочных буксиров, из коих два конца по 5 дюймов, остальные по $4\frac{1}{2}$ дюйма и завезены на расстояние около 120—150 м четыре якоря (*7, 8, 9, 10*), как показано на схеме, и на них поданы оттяжки (шпринги) из стального троса около 4 дюймов толщиною. Якоря взяты весом около 3 т каждый.

В расстоянии 160 м выше по течению от кессона поставлена на якорях прочная речная баржа, снабженная солидными битенгами, служащими для крепления поданных с нее на кессон вышеуказанных шести буксиров, а также для крепления якорных канатов этой баржи — якорницы.

---

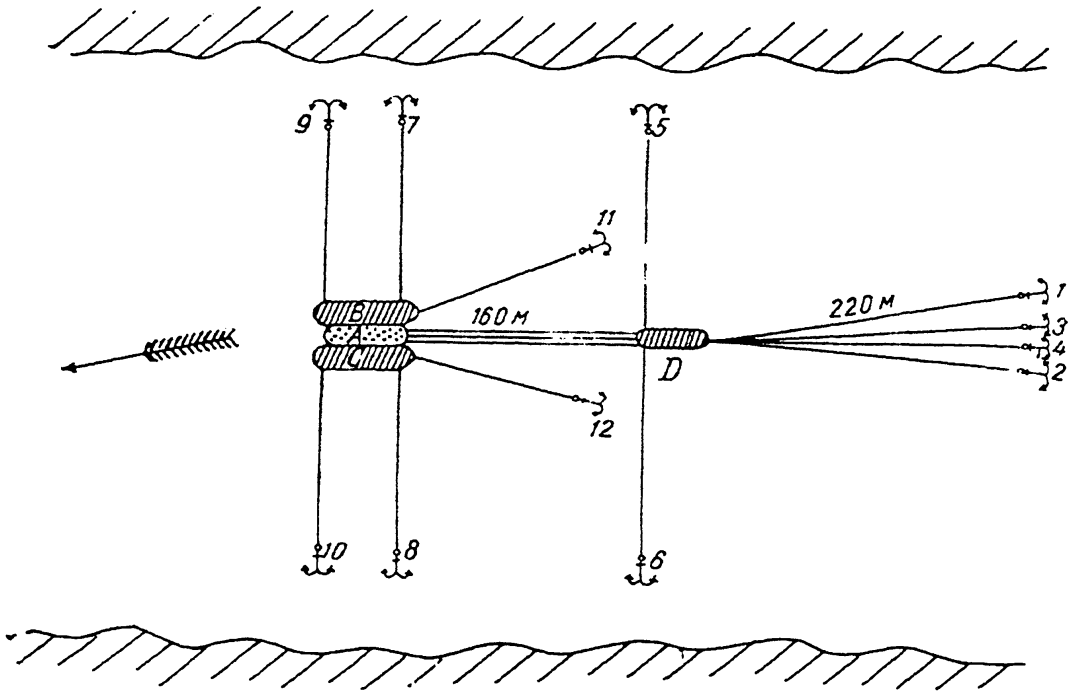
[1] Всякий перлинь, поданный с кормы одного судна на нос другого, зовется *буксир*.

[2] Перлинь, поданный с одного судна на борт другого или на берег, зовется *швартов*.

Якоря, на которые поставлена якорница, следующие (фиг. 1):

№ якоря	Вес (тонны)	Толщина каната (миллиметры)
1	6	63
2	6	51
3	5	37
4	3	стальной перлинь $4\frac{1}{2}$ дюйма.

Длина всех канатов 220 м.



Фиг. 1.

Кроме того, завезены якоря *5* и *6* весом по 3 т и на них поданы такие же $4\frac{1}{2}$-дюймовые оттяжки, как с кессона.

В настоящее время (25 VII) канаты главных становых якорей *1* и *2* хорошо выравнены, канат *3* и перлинь *4* натянуты несколько сильнее, так что смотрят вперед от главных канатов и служат как бы предохранением, чтобы случайно плоты или суда не навалили на главные канаты *1* и *2*.

Все оттяжки, чтобы не мешать судоходству, стравлены.

Якоря *11* и *12*, на которые поданы с баржей у кессона стальные $4\frac{1}{2}$-дюймовые перлиня, служат временно и положены для того, чтобы, не стесняя судоходства, уменьшить рыскание системы *ABC*.

Скорость течения в этом месте достигает 2 м в секунду. Сопротивление воды на кессон составит, приблизительно,

$$F = 1.0 \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot S$$

где v — скорость течения в м/сек., S — погруженная площадь поперечного сечения кессона, g — ускорение силы тяжести. В нашем случае будет

$$F = 1.0 \cdot \frac{2 \cdot 2}{2 \cdot 9.8} \cdot 15.11 = 34 \text{ т}$$

прибавляя 6 т на сопротивление барж и буксиров, видим, что будет приближенно

$$F = 40 \text{ т}$$

Рвущее же усилие 6 буксиров составляет

2 конца по 5 дюймов . . .	$2 \cdot 50 = 100$ т
4 конца по $4\frac{1}{2}$ дюйма . . .	$4 \cdot 39 = 156$ „
Итого	256 т

что более чем в *шесть* раз превышает действующее усилие.

Все буксиры отлично выравнены, т. е. идут параллельно между собою (с одинаковым уклоном к горизонту у якорницы) и, значит, испытывают каждый натяжение, пропорциональное своему предельному сопротивлению, как о том сказано ниже.

Предельное сопротивление якорных канатов якорницы составляет (см. табл. 3):

№ каната	Толщина (миллиметры)	Предельное сопротивление (тонны)
1	63	174.6
2	51	114.4
3	37	60.0
4 (перлинь)	$4\frac{1}{2}$ дюйма	39.0
	Итого	333.0 т.

Это почти в 10 раз превышает действующее усилие.

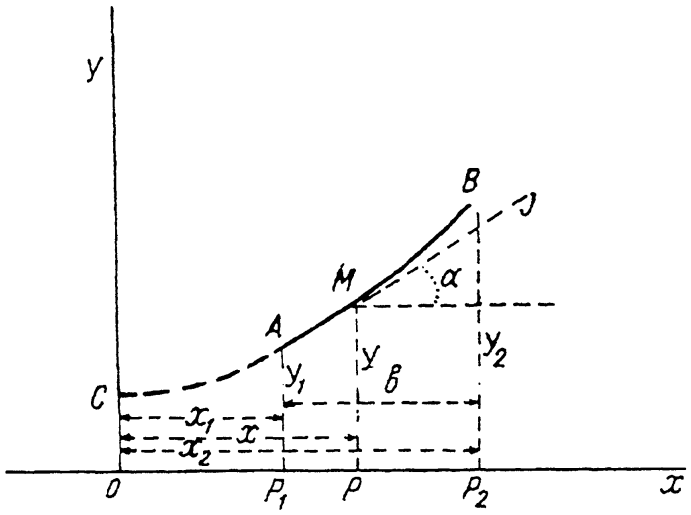
Битенги сосновые толщиною около 40 см, так что на срез их предельное сопротивление превышает 240 т; хотя битенги в своих пяртнерсах не заклинены, но пригнаны к утолщенному палубному настилу достаточно плотно.

Степсы всех кнехтов укреплены к набору достаточно хорошо, так что по своему устройству все битенги представляются вполне надежными и по своей крепости соответствуют снастям и цепям, за них закрепленным.

4. Общие расчетные формулы. Распределение усилий; потенциальная энергия системы буксиров и якорных канатов

Нам необходимо будет определить не только статические усилия, действующие на каждый буксир или канат, но и ту энергию, которую система способна воспринять при динамической нагрузке, если бы случайно стравили буксиров больше, нежели желательно, или у неопытной команды буксиры при потравливании стало бы сучить.

Для этого можно воспользоваться свойствами так называемой *цепной линии*, теория которой излагается в любом курсе теоретической механики, но обыкновенно там опускаются те приложения, которые нужны в нашем вопросе.



Фиг. 2.

Задача о цепной линии ставится обыкновенно в такой форме: между двумя заданными точками A и B протянута совершенно гибкая нерастяжимая нить, длина которой $AMB=l$ и вес погонного метра которой есть q; спрашивается, какова форма нити и каково натяжение в любой ее точке.

Пусть точка C (фиг. 2) есть самая низшая точка той неограниченно продолженной кривой, форму которой нить принимает (положение этой точки нам пока неизвестно и в определении его и заключается, как увидим ниже, весь вопрос). Проводим через эту точку вертикальную ось Oy, откладываем по ней от точки C вниз величину a, нам пока также неизвестную, и через полученную точку O проводим ось абсцисс Ox горизонтально. Делаем указанные на чертеже (фиг. 2) обозначения, а именно

$$OC=a;\quad OP_1=x_1;\quad OP=x;\quad OP_2=x_2;\quad x_2-x_1=b$$
$$P_1A=y_1;\quad PM=y;\quad P_2B=y_2;\quad y_2-y_1=c.$$

Величины b и c заданы, все прочие пока неизвестны.

Общее уравнение кривой $CAMB$ есть

$$y=a\cdot\frac{e^{\frac{x}{a}}+e^{-\frac{x}{a}}}{2}=a\operatorname{ch}\frac{x}{a} \tag{7}$$

причем

$$a=\frac{T_0}{q} \tag{8}$$

где T_0 есть натяжение, которое нить имела бы в точке C, вместе с тем это есть горизонтальная проекция натяжения T в любой точке M, ибо по свойству цепной линии

$$T\cos\alpha = T_0 \tag{9}$$

Из уравнения (7) следует:

1) наклон α касательной в точке M к горизонту

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dy}{dx} = \operatorname{sh}\frac{x}{a} \tag{10}$$

2) длина дуги CM от вершины C до точки M

$$CM = s = a\operatorname{sh}\frac{x}{a} = a\operatorname{tg}\alpha \tag{11}$$

3) из уравнений (9) и (10) следует

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha}} = \frac{1}{\operatorname{ch}\frac{x}{a}} = \frac{a}{y}$$

$$T = \frac{T_0}{a}y = qy \tag{12}$$

В нашем случае предполагаются заданными величины b, c и длина дуги $AB = l$, требуется найти a, x_1 и x_2.

Для этого определения имеем следующие три уравнения

$$\operatorname{ch}\frac{x_2}{a} - \operatorname{ch}\frac{x_1}{a} = \frac{c}{a} \tag{13}$$

$$\operatorname{sh}\frac{x_2}{a} - \operatorname{sh}\frac{x_1}{a} = \frac{l}{a} \tag{14}$$

$$x_2 - x_1 = b \tag{15}$$

Первые два уравнения, (13) и (14), можно писать так

$$2\operatorname{sh}\frac{x_2-x_1}{2a}\cdot\operatorname{sh}\frac{x_2+x_1}{2a} = \frac{c}{a} \tag{13'}$$

$$2\operatorname{sh}\frac{x_2-x_1}{2a}\cdot\operatorname{ch}\frac{x_2+x_1}{2a} = \frac{l}{a} \tag{14'}$$

из них следует

$$\operatorname{th}\frac{x_2+x_1}{2a} = \frac{c}{l} \tag{16}$$

Возвысив уравнения (13′) и (14′) в квадрат и вычтя первое из второго, имеем

$$4\operatorname{sh}^2\frac{x_2-x_1}{2a} = \frac{l^2-c^2}{a^2} \tag{17}$$

Из этого уравнения и (15) следует

$$\frac{\sqrt{l^2-c^2}}{2a}=\operatorname{sh}\frac{b}{2a} \tag{18}$$

Положим для краткости письма

$$\frac{1}{2a}=\sigma;\quad \sqrt{l^2-c^2}=\lambda \tag{19}$$

тогда уравнение (18) напишется так

$$\operatorname{sh} b\sigma-\lambda\sigma=0 \tag{20}$$

причем b и λ известны. Из этого уравнения, заметив, что вообще

$$\operatorname{sh}\gamma=\gamma+\frac{1}{6}\gamma^3+\ldots$$

получим, как исходное приближение

$$\sigma=\sqrt{6\cdot\frac{n-b}{b-\lambda}}$$

Затем по таблицам функции sh последовательными приближениями находим величину σ и по ней величину a, после чего уравнение (16) доставит x_2+x_1, что вместе с уравнением (15) даст значения x_2 и x_1 в отдельности, и все элементы искомой цепной линии будут известны.

Но такая обычная постановка и решение задачи о цепной линии неприменима в нашем случае, ибо требует точного знания как длины l, так и величины b, ибо величина $\lambda=\sqrt{l^2-c^2}$ весьма близка к величине $b=\sqrt{l_1^2-c^2}$, где l_1 есть хорда AB, следовательно для точного определения σ надо бы точно знать разность $l-l_1$, что практически при дуге малой кривизны, как в нашем случае, невозможно; поэтому в нашем случае для определения цепной линии надо исходить из других величин, доступных простому и достаточно точному измерению, а именно из величины угла наклона α в точке B, где буксир или якорный канат сходит с якорницы. Само собой разумеется, что этот угол определяется или по его тангенсу, или по его синусу.

В самом деле стоит только обмерить (фиг. 3) возвышение клюза K над водою или над грузовой ватерлинией и длину KH перлиня или цепи от клюза до входа в воду, и мы получим $\sin\alpha$, а значит и $\operatorname{tang}\alpha$.

Заметим здесь же, что якорные цепи имеют звенья, длина коих равна $6d$, где d — диаметр железа звена, поэтому, если от клюза до воды n звеньев, то длина $KH=4nd$.

Пусть будет

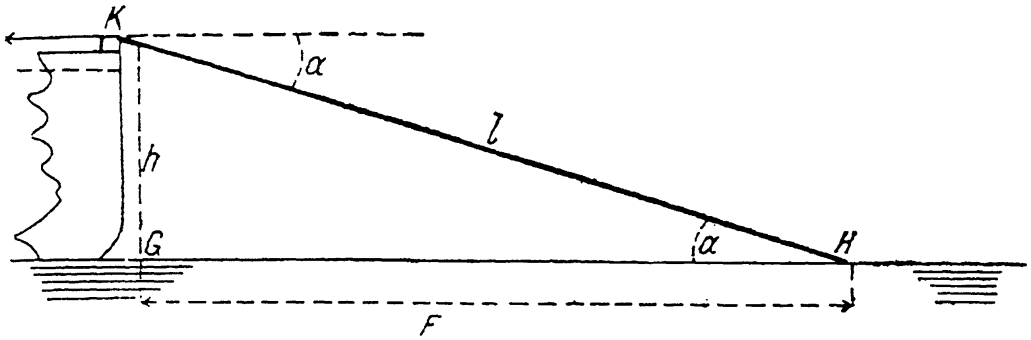
$$\operatorname{tg}\alpha=k \tag{21}$$

тогда вместо уравнений (13), (14), (15) мы будем иметь уравнения

$$\operatorname{ch}\frac{x_2}{a}-\operatorname{ch}\frac{x_1}{a}=\frac{c}{a} \tag{22}$$

$$\operatorname{sh}\frac{x_2}{a}=k \tag{23}$$

$$x_2-x_1=b \tag{24}$$



Фиг. 3.

Решение этих уравнений в нашем случае упрощается тем обстоятельством, что величины $\frac{x_2}{a}$ и $\frac{x_1}{a}$ настолько малы, что для исходного приближения можно полагать

$$\operatorname{ch}\frac{x_2}{a}=1+\frac{1}{2}\left(\frac{x_2}{a}\right)^2;\quad \operatorname{ch}\frac{x_1}{a}=1+\frac{1}{2}\left(\frac{x_1}{a}\right)^2$$

$$\operatorname{sh}\frac{x_2}{a}=\frac{x_2}{a}$$

тогда предыдущие уравнения будут

$$x_2^2-x_1^2=2ac \tag{22'}$$

$$x_2=ak \tag{23'}$$

$$x_2-x_1=b \tag{24'}$$

из них находим

$$x_2+x_1=\frac{2ac}{b} \tag{25}$$

и затем

$$x_2=\frac{b}{2}+\frac{ac}{b} \tag{26}$$

$$x_1=\frac{ac}{b}-\frac{b}{2} \tag{27}$$

$$a=\frac{b^2}{2(bk-c)} \tag{28}$$

Но мы видели, что

$$a=\frac{T_0}{q} \tag{29}$$

значит будет

$$T_0 = q\frac{b^2}{2(bk-c)} \tag{30}$$

и полное натяжение в точке K

$$T = \frac{T_0}{\cos\alpha} = T_0\sqrt{1+k^2} \tag{31}$$

Возвышение клюза над водой обыкновенно не требует обмера, а известно по углублению судна, значит надо обмерить только расстояние от клюза до входа перлиня или цепи в воду, тогда, зная b, c и q, по формуле (31), найдем натяжение цепи или перлиня, которые таким образом служат как бы динамометрами сами себе.

Более того, формула (31) показывает, что при данных b и c и одинаковом k — наклоне буксиров или цепей к горизонту их *натяжение пропорционально* q, т. е. весу одного погонного метра перлиня или цепи, величина же q пропорциональна площади сечения, иначе крепости (рвущему или допускаемому усилию на перлинь или цепь), следовательно *при равенстве наклонов, т. е. параллельности, все перлиня нагружены пропорционально своей крепости, т. е. до одинаковой доли своего предельного или прочного сопротивления.*

В нашем случае все поданные с якорницы на кессон буксиры между собою параллельны, т. е. одинаково наклонены к горизонту, и так как вес перлиня в воде q пропорционален его весу q_0 в воздухе, то в нашем случае нет надобности решать какие бы то ни было уравнения и делать какие бы то ни было обмеры, надо просто для нахождения натяжения каждого перлиня в отдельности полное давление воды на кессон $F = 40$ т разделить пропорционально весам q_0 погонного метра этих перлиней в воздухе, т. е. числам: 453, 453, 358, 358, 358, 358, и мы получим:
натяжение 5-дюймовых перлиней

$$T_0' = 40 \cdot \frac{453}{2338} = 7.76 \text{ т}$$

натяжение $4\frac{1}{2}$-дюймовых перлиней

$$T_0'' = 40 \cdot \frac{358}{2338} = 6.12 \text{ т}$$

Так как угол α около 10°, то полное натяжение будет на $1\frac{1}{2}\%$ больше его горизонтальной проекции, ибо $\cos 10° = 0.985$, и кругло будет:
натяжение 5-дюймовых

$$T' = 7.9 \text{ т}$$

натяжение $4\frac{1}{2}$-дюймовых

$$T'' = 6.2 \text{ т}$$

что составляет $\frac{1}{6.3}$, т. е., кругло, 16% от предельного сопротивления этих перлиней.

Само собою разумеется, что все эти заключения остаются без всяких изменений и для того случая, когда мы исходили бы из уравнений (22), (23), (24), ибо при однозначности решения этих уравнений, какою бы функцией

$$a = \varphi(b,\ c,\ k)$$

оно ни представлялось, и при данных b и c и одном и том же значении k, соответствующие величины a будут равны, т. е. будет иметь место пропорция

$$a = \frac{T_0'}{q_1} = \frac{T_0''}{q_2} = \frac{T_0'''}{q_3} = \ldots \tag{32}$$

а, значит, и пропорция

$$\frac{T_0'}{q_{01}} = \frac{T_0''}{q_{02}} = \frac{T_0'''}{q_{03}} = \ldots \tag{33}$$

при само собой понятном обозначении.

После того как величины T_0', T_0''... будут найдены или даже одна из них T_0', мы по известной величине q_1 найдем и значение a и притом как раз то самое, которое мы получили бы, решая уравнения (22), (23), (24), именно будет

$$a = \frac{T_0'}{q_1} \tag{34}$$

где q_1 есть вес погонного метра перлиня или цепи *в воде*.

Для цепи, так как удельный вес железа есть 7.8, будет

$$q = \frac{6.8}{7.8} q_0 = 0.881 q_0 \tag{35}$$

Для проволочных перлиней вес в воде составляет около 0.70 от веса в воздухе, ибо, например для 5-дюймового перлиня вес в воздухе слагается из следующих частей:

Вес 72 проволок диаметром по 2.7 мм	3.24 кг
Вес цинковки толщиною около 0.1 мм	0.40 „
Вес 7 пеньковых сердечников	0.89 „
Итого . . .	4.53 кг

Удельный вес стали 7.86, цинка 7.10, пеньковых сердечников 1.0, значит потеря веса составит:

Проволок	0.412 кг
Цинковки	0.056 „
Сердечников	0.890 „
Итого . . .	1.358 кг

т. е. 30% от веса q_0 погонного метра перлиня в воздухе. Таким образом, вес в воде q будет:
для 5-дюймового

$$q = 3.17 \text{ кг}$$

для $4\frac{1}{2}$-дюймового

$$q = 2.51 \text{ кг}$$

Соответственно этим значениям величина a будет

$$a = \frac{7760}{3.17} = \frac{6120}{2.51} = 2450 \text{ м}$$

и при

$$k = 0.10; \quad c = 10.75 \text{ м}; \quad b = 160 \text{ м}$$

имеем

$$x_2 = 245 \text{ м}; \quad x_1 = 85 \text{ м}$$

Затем будет

$$y_1 = 2450 \operatorname{ch} \frac{85}{2450} = 2450 (1 + 0.000612) = 2450 + 1.50$$

$$y_2 = 2450 \operatorname{ch} \frac{245}{2450} = 2450 (1 + 0.00500) = 2450 + 12.25$$

$$\frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 2450 + 6.875$$

$$y_3 = 2450 \operatorname{ch} \frac{165}{2450} = 2450 \left[1 + \frac{1}{2}(0.0673)^2\right] = 2450 + 5.55$$

Провес e_0 от середины хорды $e_0 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) - y_3 = 1.32$ м

Определим теперь, какую энергию может поглотить наш 5-дюймовый перлинь при условии, что наибольшее его напряжение не превзойдет 75% от рвущего, т. е. будет не более 37.5 т.

Модуль упругости проволочного троса составляет $\frac{1}{3}$ модуля упругости проволок, из коих он свит, что в нашем случае будет кругло 750 000 кг/см^2 = 750 т/см^2

Площадь сечения металла $s = 72 \cdot \frac{\pi}{4}(0.27)^2 = 4.12$ см^2, следовательно относительное удлинение будет

$$\sigma = \frac{37.5}{4.12} \cdot \frac{1}{750} = 0.0121$$

при длине 160 м абсолютное удлинение составит

$$160 \cdot \sigma = 1.93 \text{ м}$$

и поглощаемая энергия

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot 37.5 \cdot 1.93 = 36.3 \text{ тонно-метра (т. м)}$$

При натяжении 7.9 т энергия будет

$$E_2 = \left(\frac{7.9}{37.5}\right)^2 \cdot E_1 = 0.225 E_1 = 8.2 \text{ т} \cdot \text{м}$$

Значит

$$E_1 - E_2 = 28.1 \text{ т} \cdot \text{м}$$

Очевидно, что центр тяжести дуги лежит между вершиною дуги и ее хордой, а так как стрелка составляет 1.32 м, то если бы перлинь вытянулся даже в прямую линию, — подъем его центра тяжести составит меньше 1.32 м и при полном весе перлиня в воде $160 \cdot q = 160 \cdot 3.17 = 510$ кг $= 0.51$ т приращение потенциальной энергии составит меньше $0.51 \cdot 1.32 = 0.66$ т · м, т. е. эта энергия может быть пренебрегаема по сравнению с энергией сил упругости, развивающихся при растяжении перлиня. Таким образом, для буксиров, поданных с баржи на кессон, нет надобности вычислять потенциальную энергию силы тяжести.

Энергия сил упругости для 4 $\frac{1}{2}$-дюймовых перлиней будет

$$E_1 = 36.3 \cdot \left(\frac{4.5}{5.0}\right)^2 = 29.1 \text{ т} \cdot \text{м}$$

Следовательно, полная энергия для всех шести концов от полной их слабины до наибольшего допустимого натяжения составит

$$E = 2 \cdot 36.3 + 4 \cdot 29.1 = 189 \text{ т} \cdot \text{м}.$$

Для якорных канатов и перлиня якорницы при условии, что натяжение канатов не превзойдет 18 $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ и перлиня 30 т, т. е. $\frac{3}{4}$ рвущего усилия, получим:

относительное удлинение канатов

$$\sigma = \frac{1800}{2200000} = 0.000818$$

абсолютное удлинение канатов

$$\varepsilon = 220 \cdot \sigma = 0.18 \text{ м}$$

Таким образом, энергия упругого растяжения составит:

Канат *1* (63 мм)	$\frac{1}{2} \cdot 113 \cdot 0.18 = 10.1$	т · м.
Канат *2* (51 мм)	$\frac{1}{2} \cdot 73 \cdot 0.18 = 6.6$	„ „
Канат *3* (37 мм)	$\frac{1}{2} \cdot 60 \cdot 0.18 = 5.4$	„ „
Итого . . .	22.1	т · м.

Энергии $4\frac{1}{2}$-дюймового перлиня, которая составила бы около 40 т · м, считать нельзя, ибо при наибольшем напряжении перлиня его удлинение составило бы 2.64 м, а растяжение цепей составляет всего 0.18 м; ясно, что все будет поглощаться цепями, а натяжение перлиня почти не изменится.

Если для цепей вследствие малой их растяжимости энергия сил упругости ничтожно мала, то потенциальная энергия силы тяжести вследствие большого веса цепей имеет значительную величину. Для учета этой энергии надо определить ту форму, которую имеют цепные канаты, на которых якорница стоит.

Натяжение $4\frac{1}{2}$-дюймового перлиня, судя по его уклону и по сравнению с кормовыми буксирами, можно принять кругло в 5 т. Остающееся усилие в 35 т распределяется между тремя якорными канатами пропорционально их весу, ибо их уклоны по выходе из клюзов и их длины весьма близки между собою.

Веса канатов на 1 погонный метр в воде составляют:

$$\text{для } 1 \qquad q_1 = 85.7 \cdot \frac{6.8}{7.8} = 74.7 \text{ кг}$$

$$\text{для } 2 \qquad q_2 = 56.2 \cdot \frac{6.8}{7.8} = 48.1 \text{ кг}$$

$$\text{для } 3 \qquad q_3 = 40.0 \cdot \frac{6.3}{7.8} = 39.9 \text{ кг}$$

Соответственно этому натяжения будут:

$$T_0' = 16.05 \text{ т}$$
$$T_0'' = 10.35 \text{ т}$$
$$T_0''' = 8.60 \text{ т}$$

следовательно, будет

$$a = \frac{16.15}{74.7} = \frac{10.35}{48.1} = \frac{8.60}{39.9} = 215 \text{ м}$$

Легко видеть, что при таких натяжениях большая часть цепи лежит на дне, так что вершина C цепной линии будет на дне в том месте, где начинается подъем цепи (фиг. 4), так что цепь имеет форму, показанную на этой схеме.

Схема эта составлена без соблюдения масштаба и служит лишь для наглядного представления сделанных обозначений. При этих обозначениях имеем для точки B

$$215 \operatorname{ch} \frac{x_1}{215} = 215 + 17 \tag{36}$$

т. е.

$$\operatorname{ch} \frac{x_1}{215} = 1 + \frac{17}{215} = 1.079$$

и по таблицам значений функции ch находим

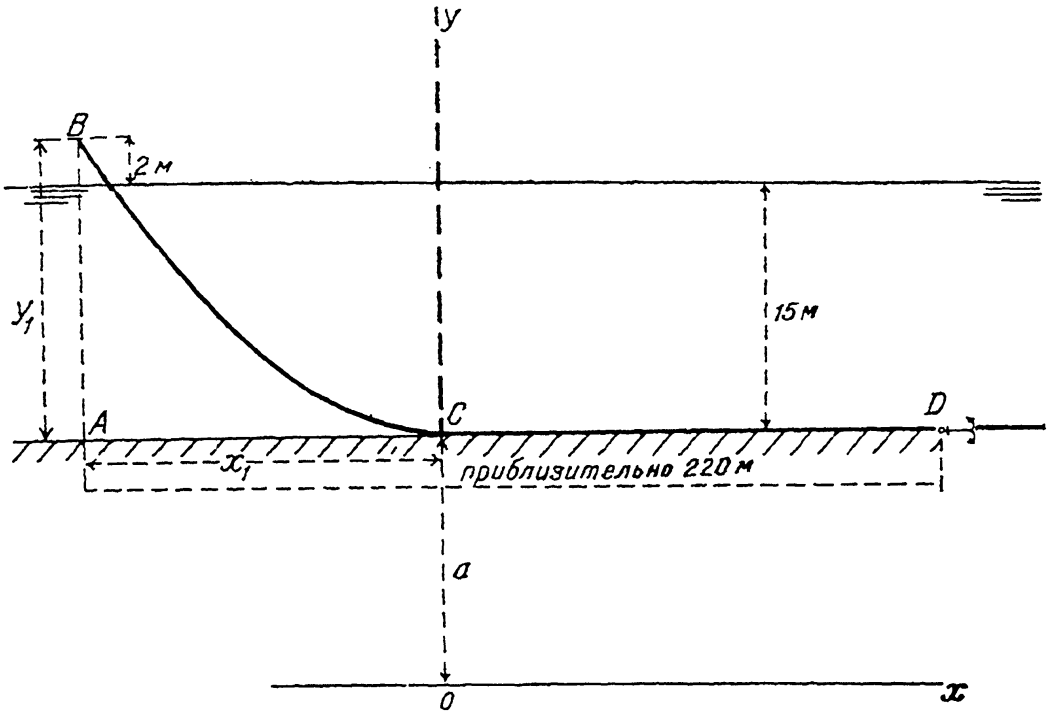
$$\frac{x_1}{215}=0.395$$

значит

$$x_1=85 \text{ м}$$

Длина дуги

$$BC=215\cdot \operatorname{sh}\frac{x_1}{215}=215\cdot \operatorname{sh}0.395=215\cdot 0.405=87.1 \text{ м}$$



Фиг. 4.

а так как длина каната $BCD=220$ м, то будет

$$CD=220-BC=220-87.1=132.9 \text{ м}$$

и расстояние от баржи до якоря

$$AD=132.9+AC=132.9+85.0=217.9 \text{ м}$$

Положим теперь, что по какой бы то ни было причине канаты будут вытянуты до своего предельного допустимого напряжения, которое, например, для *1* составляет 112 т, т. е. в 7 раз больше вышеприведенного рабочего. При таком натяжении будет

$$a=215\cdot 7=1505 \text{ м}$$

следовательно, вместо уравнения (36), будем иметь

$$1505\cdot \operatorname{ch}\frac{x_1}{1505}=1505+17 \qquad (37)$$

откуда следует

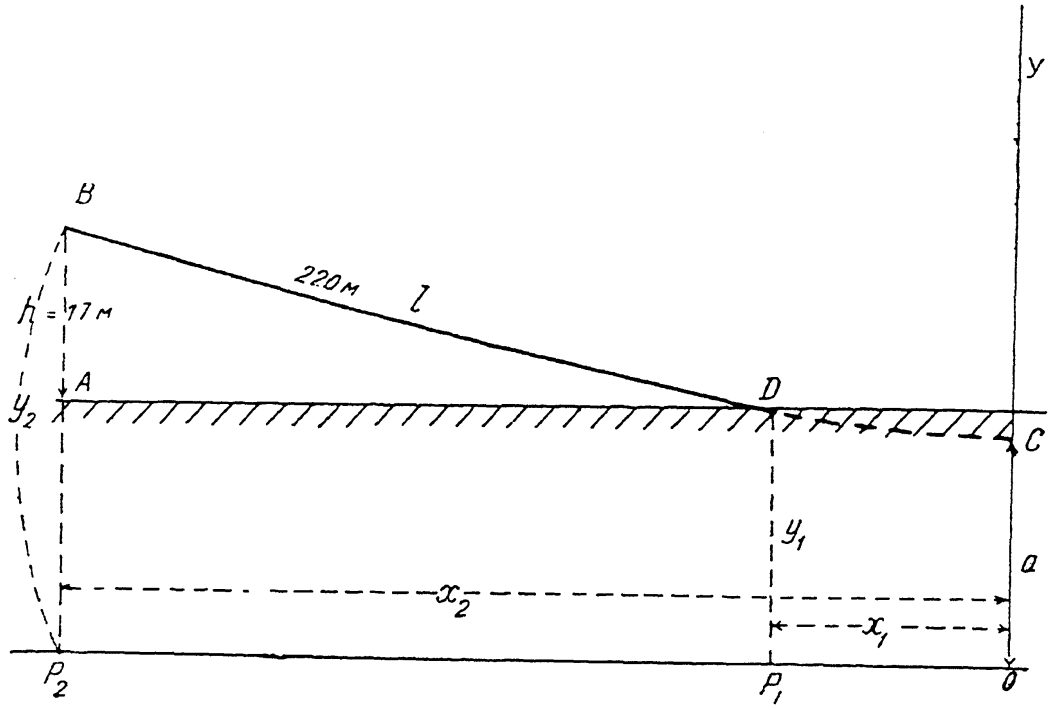
$$\operatorname{ch}\frac{x_1}{1505}=1.0113;\quad \frac{x_1}{1505}=0.150;\quad x_1=225.8\text{ м} \tag{38}$$

и длина дуги BC будет

$$BC=1505\cdot\operatorname{sh}0.150=1505\cdot 0.1506=226.6\text{ м}$$

Это показывает, что вершина C лежит вправо от точки D и схема фиг. 4 должна быть заменена схемою фиг. 5, и делая указанные на этой последней обозначения, а именно:

$$OP_1=x_1;\quad OP_2=x_2;\quad BD=l=220\text{ м};\quad AB=h=17\text{ м}$$
$$P_2B=y_2;\quad P_1D=y_1$$



Фиг. 5.

мы получим следующие уравнения

$$\left.\begin{aligned} a\left(\operatorname{ch}\frac{x_2}{a}-\operatorname{ch}\frac{x_1}{a}\right)&=h\\ a\left(\operatorname{sh}\frac{x_2}{a}-\operatorname{sh}\frac{x_1}{a}\right)&=l\end{aligned}\right\} \tag{39}$$

из которых следует

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{th}\frac{x_2+x_1}{2a}&=\frac{h}{l}\\ 4a^2\operatorname{sh}^2\frac{x_2-x_1}{2a}&=l^2-h^2\\ \operatorname{sh}\frac{x_2-x_1}{2a}&=\frac{\sqrt{l^2-h^2}}{2a}\end{aligned}\right\} \tag{40}$$

которые при $a=1505$ доставляют

$$x_2=223.5 \text{ м}$$
$$x_1=\ \ 4.3 \text{ м}$$

Уклон в точке D будет

$$\operatorname{tg}\alpha=\operatorname{sh}\frac{4.3}{1505}=0.003, \quad \text{т. е. } \alpha=0^\circ 10'$$

Это показывает, что даже при наибольшем допустимом натяжении канатов якоря не выворачиваются из грунта, а *тянутся горизонтально*, т. е. так, что они представляют наибольшее сопротивление, следовательно якоря положены совершенно правильно, и длина канатов взята как раз соответствующая глубине воды.

Обратимся теперь к учету энергии силы тяжести. Статический момент длины дуги цепной линии при схеме фиг. 4 будет

$$M_1=\int_0^{x_1} y\,ds=a\int_0^{x_1}\operatorname{ch}^2\frac{x}{a}\,dx=\frac{a}{2}\int_0^{x_1}\left(1+\operatorname{ch}\frac{2x}{a}\right)dx=\frac{a}{2}\left(x_1+\frac{a}{2}\operatorname{sh}\frac{2x_1}{a}\right)$$

$$\text{Длина дуги } BC=s_1=a\cdot\operatorname{sh}\frac{x_1}{a}=87.1 \text{ м}$$

Таким образом, будет при $x_1=85.0$ и $a=215$

$$Y_1=\frac{M_1}{s_1}=221.1 \text{ м}$$

и от дна реки

$$\eta_1=221.1-215=6.1 \text{ м}$$

и, следовательно, ордината общего центра тяжести всей цепи, считая от дна реки, будет

$$\eta_0=\frac{87.1\cdot 6.1}{220}=2.40 \text{ м}$$

При выгянутой цепи соответственно схеме фиг. 5 будет

$$M_2=\int_{x_1}^{x_2} y\,ds=\frac{a}{2}\int_{x_1}^{x_2}\left(1+\operatorname{ch}\frac{2x}{a}\right)dx=\frac{a}{2}\left[x_2-x_1+\frac{a}{2}\left(\operatorname{sh}\frac{2x_2}{a}-\operatorname{sh}\frac{2x_1}{a}\right)\right]$$

Длина же дуги $s=220$ м.

Отсюда при

$$a=1505; \quad x_1=4.3; \quad x_2=223.5$$

получаем

$$Y_2=\frac{M_2}{s_2}=\frac{752.5\cdot 441.5}{220}=1510.2 \text{ м}$$
$$\eta_2=1510.2-1505=5.2 \text{ м}$$

Таким образом, приращение потенциальной энергии будет при полном весе цепей в воде, равном 16.4 + 10.6 + 8.8, т. е. 35.8 т,

$$E = 35.8\,(5.2 - 2.40) = 100 \text{ т} \cdot \text{м}$$

тогда как энергия упругого растяжения составляет 22 т · м.

Таким образом, полный запас энергии составляет:

Энергия буксиров	189 т · м
Энергия растяжения цепей	22 „ „
Энергия веса цепей	100 „ „
Итого . . .	311 т · м

Энергия $4\frac{1}{2}$-дюймового перлиня, взятого от баржи-якорницы, не включена, ибо она не может быть использована.

Этот запас потенциальной энергии и представляет так называемое *живое сопротивление системы*, которым поглощаются всякие внезапно приложенные усилия, или кинетическая энергия частей системы, когда они по какой-либо причине приобретут некоторую скорость.

5. Учет главнейших случаев поглощения кинетической энергии

Вес кессона при погружении составляет 6600 т, две баржи при нем 600 т, а всего кругло 7200 т, так что масса удерживаемой буксирами системы составляет 735, выражая силы в тоннах, длины в метрах и время в секундах.

Определим сперва, какую скорость v могла бы получить эта система, соответствующая которой кинетическая энергия могла бы быть поглощена буксирами и якорными канатами, пренебрегая массою самой якорницы.

Эта скорость определяется уравнением

$$\frac{1}{2} \cdot 735 \cdot v^2 = 311$$

откуда следует $v = 0.92$ м/сек., т. е. 1.8 узла.

Но эта скорость значительно меньше действительной, ибо при таком расчете неявно предположено, что *якоря абсолютно не сдают* и что их не потащит, когда натяжение канатов будет близко к предельному допустимому. Между тем в илистом грунте, когда натяжение каната составляет приблизительно 12 раз взятый вес якоря, то якорь тащит. Совокупное натяжение буксиров при этом составит около 200 т, и достаточно, чтобы якоря протащило 5 м, тогда будет поглощено еще 1000 т · м энергии, и скорость могла бы составить до 2 м в секунду, без того чтобы систему сорвало с якорей.

Канат *1* толщиною 63 мм соответствует кораблю водоизмещением в 15 000 т, масса которого кругло 1500; полная энергия, которую такой

канат мог бы поглотить, если бы при отдаче якоря на 15-метровой глубине заготовить на клюз 220 м каната, составила бы

$$16.34 \cdot 5.20 + 10 = 95 \text{ т} \cdot \text{м}$$

значит

$$v^2 = \frac{2 \cdot 95}{1500} = 0.127; \quad v = 0.36 \text{ м/сек}$$

т. е. около $\frac{3}{4}$ узла. Между тем, при меньшей длине каната на клюзе, на таком корабле отдают якорь и при скорости в 2 или $2\frac{1}{2}$ узла, чему соответствует энергия в 7 или в 11 раз бо́льшая исчисленной выше, и канат не рвется. Это происходит потому, что якорь не заделан в скалу, а находится в сдающем илистом грунте и как только натяжение каната станет близко к предельному допустимому, го якорь сдает и его тащит в грунте.

Три якорных каната якорницы по своей крепости соответствуют двум канатам толщиною по 63 мм. При спуске на воду броненосцев водоизмещением в 15 000 т спусковой вес составляет около 5000 т, скорость их по входе целиком в воду составляет около 5 м в секунду, так что их кинетическая энергия кругло равна 6250 т · м. Как только корабль сойдет со спускового фундамента, отдают оба якоря, имея на клюзе около 200 м каната; будь якоря заделаны в скалу, они поглотили бы всего около 200 т · м энергии и при рвущем усилии в 350 т должны бы оборваться. Между тем с 1887 г. я присутствовал при спуске всех больших судов Балтийского флота и канаты ни разу не рвались, ибо якоря тащило примерно 30—40 м в илистом грунте Невы у Балтийского и Адмиралтейского заводов.

Таким образом, можно с уверенностью сказать, что *ни обрыва буксиров, ни обрыва якорных канатов ни при каких возможных при постановке кессона случайностях произойти не может.*

Рассмотрим теперь, что произойдет, если во время постановки кессона, от какой-либо случайности при потравливании буксиров их начнет сучить, и их упустят до полной слабины, а затем, когда кессон уже приобретает некоторую скорость, перлиня завернут на назначенные марки, ибо иначе их станет рвать по очереди.

После того как перлиня ослабнут, кессон начнет двигаться; покажем, как рассчитать это движение и натяжение перлиней.

Пусть M есть масса кессона и барж, к нему ошвартовленных, c — скорость течения, v — скорость кессона в момент времени t, считаемого от начала движения, x — пройденный путь, F — давление воды.

Мы видели, что сила F пропорциональна квадрату скорости кессона по отношению к воде, так что при скорости кессона v будет

$$F = k_1 (c - v)^2 \qquad (41)$$

причем k_1 есть постоянный множитель, величина которого будет указана при численных расчетах. Значит уравнения движения будут

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{42}$$

$$M\frac{dv}{dt} = k_1 (c - v)^2$$

Пусть будет

$$k = \frac{k_1}{M}$$

тогда получим

$$\frac{dv}{(c-v)^2} = kdt \tag{43}$$

и по интегрировании

$$\frac{1}{c-v} = kt + C_1 \tag{44}$$

где C_1 есть произвольная постоянная, определяемая условием, что при $t=0$ должно быть $v=0$, так что $C_1 = \frac{1}{c}$, и предыдущее уравнение будет

$$\frac{1}{c-v} - \frac{1}{c} = kt$$

откуда следует

$$\frac{v}{c} = \frac{ckt}{1+ckt} \tag{45}$$

и на основании уравнения (42)

$$\frac{1}{c}\cdot\frac{dx}{dt} = \frac{ckt}{1+ckt} = 1 - \frac{1}{1+ckt}$$

по интегрировании имеем

$$\frac{1}{c}(x + C_2) = t - \frac{1}{ck}\log(1+ckt) \tag{46}$$

постоянная произвольная $C_2=0$, ибо при $t=0$ должно быть $x=0$, таким образом будет

$$x = ct - \frac{1}{k}\log(1+ckt)$$

формулы (45) и (46) и решают вопрос о движении кессона при ослабленных перлинях.

Положим, что перлиня получили слабину a, значит, с того момента, когда будет $x=a$, начнется натяжение перлиней и вторая фаза движения, т. е. постепенное замедление кессона. Будем для этой фазы движения считать время с того момента, когда $x=a$, и это время обозначим

через t_1, и пусть скорость кессона в момент $t_1 = 0$ есть $v = v_1$, причем, очевидно, будет $v_1 < c$, и, значит, живая сила кессона будет

$$S = \frac{1}{2} M v_1^2 = \frac{1}{2} 735\, v_1^2 = 368\, v_1^2$$

и мы видели, что перлиня и канаты, даже если бы якоря совершенно не сдавали, могут поглотить энергию в 311 т · м, соответствующую скорости $v_1 = 0.92$ м/сек., причем упругим растяжением перлиней поглощаются 211 т · м, и их натяжение не превосходит 75% от рвущего.

Здесь необходимо, однако, заметить, что энергия цепей, равная 100 т · м, соответствует их натяжению в 280 т и, значит, не используется полностью, когда их натяжение составляет 200 т, а всего приближенно лишь до $100 \cdot \left(\frac{200}{280}\right)^2 = 50$ т · м, так что полная кинетическая энергия, которая может быть поглощена, составляет 261 т · м, чему соответствует скорость 0.84 м/сек. Прежде всего и надо рассчитать, при каком значении $x = b$ кессон достигает скорости 0.84 м/сек. Для этого надо обратиться к формулам (45) и (46) и произвести по ним численное вычисление по данным

$$M = 735; \quad c = 2; \quad v = 0.84; \quad k_1 = 10$$

причем последняя величина следует из того, что при скорости 2 м/сек. сила $F = 40$ т, как принято выше, значит

$$k = \frac{10}{735} = 0.0136.$$

Соответствующее скорости $v = 0.84$ время t_0 определяется равенством

$$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2 - 0.84} = 0.0136\, t_0 = 0.3621$$

откуда

$$t_0 = 26.5 \text{ сек.}$$

Соответствующее значение

$$x = b = 2 \cdot 26.5 - \frac{1}{0.0136} \log (1 + 2 \cdot 0.0136 \cdot 26.5) = 13.0 \text{ м}$$

Эти значения настолько велики, что они практически невозможны — может высучить 1, 2, в крайнем случае 5 м, но не 13 м; время в 26 сек. в таком деле составляет также большой промежуток, в течение которого поспеют задержать снасть.

Этот расчет показывает что даже при крайней оплошности кессон не поспеет приобрести такой скорости, при которой натяжение перлиней достигает опасного предела, следовательно нет надобности исследовать вторую фазу движения.

При небольших же значениях слабины, получаемой перлинями, даже не учитывая того, что *они остаются натянутыми*, и, значит, скорость будет меньше, мы получим такую табл. 5.

Таблица 5

Зависимость наибольшего натяжения перлиней от образовавшейся начальной слабины

Слабина b (метры)	Время t (секунды)	Скорость v (м/сек.)	Поглощ. энергия ε тонно-метры	$\frac{\varepsilon}{261}$	Наибольш. натяж. / допуск. натяж.	Наибольш. натяж. / рвущее натяж.
1	7.35	0.23	20	0.0767	0.23	0.21
2	10.4	0.33	41	0.1570	0.40	0.30
3	12.7	0.40	61	0.2340	0.47	0.35
4	14.7	0.46	80	0.3060	0.55	0.41
5	16.4	0.50	92	0.3520	0.59	0.44

Табл. 5 наглядно показывает, в какой мере обеспечена безопасность маневров и предотвращена возможность появления опасных натяжений перлиней и якорных канатов, причем для последних отношение наибольшего натяжения к рвущему будет приблизительно в два раза меньше показанного в таблице для перлиней.

Но главная задача состоит в том, чтобы стравить кессон на назначенное ему место с точностью до 15 см, отнюдь не перепустив его ниже по течению, ибо поднять его затем вверх по течению представило бы при имеющихся на барже-якорнице средствах значительные затруднения, и этот главный маневр должен быть в полной мере обеспечен.

6. Обеспечение маневров при постановке кессона на место

Эти маневры обеспечиваются тем, чтобы совершенно не давать образовываться слабине перлиней, для чего их надо травить поочередно по одному или в крайнем случае по два конца, каждый раз на небольшую величину, около 1 фута, так чтобы стравливаемый конец оставался натянутым; при этом на всех концах должны быть заранее положены марки, чтобы их стравливать на одинаковую наперед назначенную величину, за которой надо все время следить.

Рассчитаем сперва величины тех напряжений, которые при этом возникают.

Чтобы произвести этот расчет, надо воспользоваться формулами § 4 и рассмотреть зависимость между натяжением перлиня и длиною его,

когда величина b — горизонтального расстояния между точками закрепления — остается постоянной, при этом достаточно рассмотреть один из перлиней, например 5-дюймовый, ибо для всякого другого все элементы будут пропорциональны весу погонного метра его.

Таблица 6

Зависимость натяжения перлиня от длины его при заданной разности абсцисс точек закрепления

Натяжение T_0 (тонны)	Параметр $a=\frac{T_0}{q}$ (метры)	Абсцисса x_2 (метры)	Абсцисса x_1 (метры)	$s-b$ (метры)
1.00	315.5	101.2	—58.8	1.72
2.00	631.0	122.4	—37.6	0.76
3.00	946.5	143.6	—16.4	0.33
4.00	1262.0	165.0	+ 5.0	0.28
5.00	1577.5	135.9	+25.9	0.26
6.00	1893.0	207.2	+47.2	0.25
7.00	2208.5	228.5	+63.5	0.24
8.00	2524.0	249.6	+89.6	0.24

Из этой таблицы видно, что если, например, стравить 1.72 м этого перлиня, то его натяжение будет еще равно 1 т, и он еще не будет лежать на дне, ибо ордината его вершины есть 315.5; ордината точки закрепления за кессон есть

$$315.5 + 5.48 = 320.98$$

ордината дна реки

$$315.5 + 5.48 - 6.25 = 314.73$$

На основании табл. 6 видно, каким образом надо поступать, стравливая кессон на место, а именно: надо травить на небольшую величину, например 0.33 м, всякий раз *по два* конца того же перлиня, взятого вокруг кессона, оставляя остальные перлиня закрепленными, начиная с $4\frac{1}{2}$-дюймовых перлиней, тогда последовательные стадии маневра представляются табл. 7.

После того как все перлиня будут в такой последовательности стравлены на 0.33 м, этот маневр повторяется в той же последовательности, пока кессон придет в такое положение, что его центр будет находиться от окончательного своего проектного положения меньше чем на 0.33 м, скажем на 0.25 м, тогда, положив на перлиня соответствующую

Таблица 7

Последовательные стадии при стравливании кессона на место и соответствующие натяжения перлиней

Начальное положение		I стадия		II стадия		Конечное положение	
толщина перлиней (дюймы)	натяжение (тонны)	стравлено (метры)	натяжение (тонны)	стравлено (метры)	натяжение (тонны)	стравлено (метры)	натяжение (тонны)
5	7.76	0	9.80	0	15.20	0.33	7.76
5	7.76	0	9.80	0	15.20	0.33	7.76
$4\frac{1}{2}$	6.12	0.33	2.40	0.33	2.40	0.33	6.12
$4\frac{1}{2}$	6.12	0.33	2.40	0.33	2.40	0.33	6.12
$4\frac{1}{2}$	6.12	0	7.80	0.33	2.40	0.33	6.12
$4\frac{1}{2}$	6.12	0	7.80	0.33	2.40	0.33	6.12

марку, стравливают их в той же последовательности на эту величину и, стравив и проверив положение, опускают кессон на дно.

При такой последовательности маневра имеется полная в нем уверенность, ибо кессон при каждой стадии получает лишь самую ничтожную скорость, главная работа ложится на 5-дюймовые перлиня, причем наибольшее их напряжение не будет превосходить 15.2 т при рвущем усилии 50 т и допускаемом 37.5.

Стравив кессон так, чтобы центр кессона стал на назначенное место, надо, действуя оттяжками *у якорницы*, привести центр кессона в должное расстояние от береговых опор, а затем, действуя одною из кормовых оттяжек *у кессона* и носовою его оттяжкою с противоположного борта, привести ось кессона в назначенное направление, после чего и опустить его на дно. Действуя таким образом, мы не будем иметь надобности сильно тянуть оттяжки ни у якорницы, ни у кессона.

СУДА, ПЕРЕВОЗИВШИЕ ПАРОВОЗЫ[1]

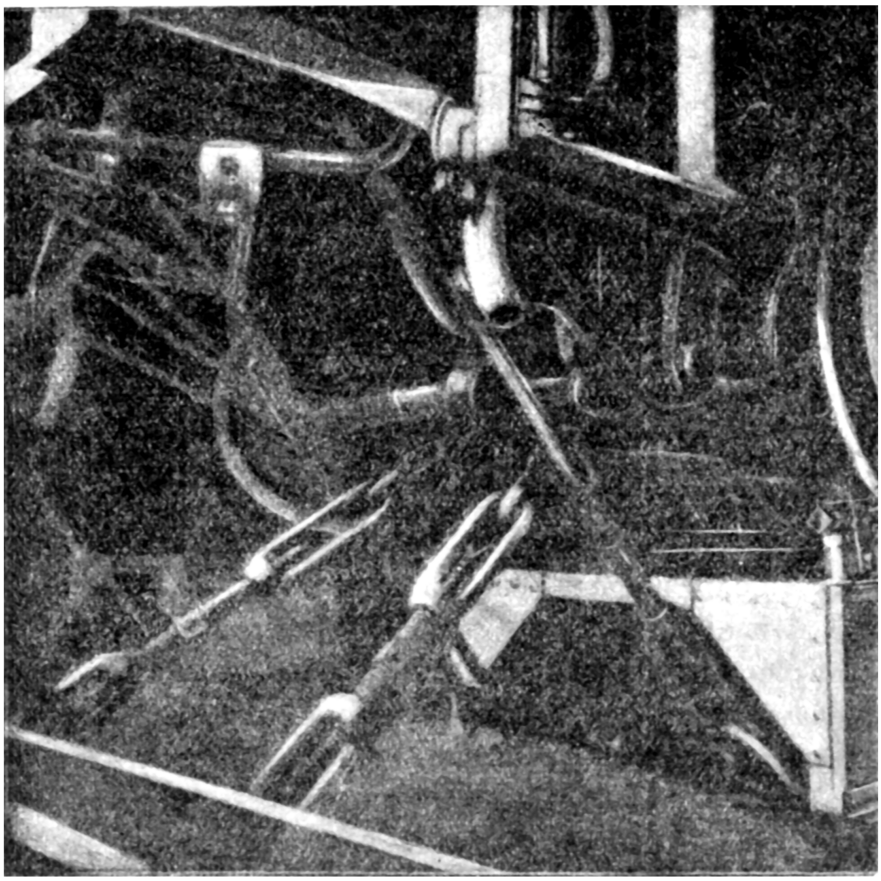
1. „Один“

„Один“ представляет своеобразное судно. Он и однотипные с ним „Эгирь“ и „Фритьоф“ были броненосцами береговой обороны германского флота. После войны они были проданы и куплены гамбургской фирмой. Новый владелец решил использовать эти суда так: сняв башни, броню, срезав борт по броневую палубу, он вынул из них котлы, машину и заменил дизелями (типа, предназначенного для подводных лодок), и получил таким образом прочные надежные грузовые теплоходы. Первым из них был готов „Один“, который и был предложен для перевозки паровозов.

Только на „Одине“ и на однотипном с ним „Эгире“ паровозы располагались на палубе, а тендера в трюме. Такое расположение многим представлялось крайне опасным и потребовало для оправдания своего специальных расчетов, приведенных в конце главы (Приложение 1-е). Из них ясно, что все дело в подвесных рессорах: если паровозу предоставить возможность свободно качаться на них, то найтовы подвергались бы опасным попеременным натяжениям, а иногда и ударам, обрыв же найтовов мог быть опасен не только для данного паровоза, но и всего судна. Но если рессоры выключить, т. е. надрессорное строение паровозов прикрепить к судну жестким образом, такая опасность исключена. Поэтому на выключение рессор помощью особых стальных вкладышей, загонявшихся между рамой и буксами, было обращено особое внимание. Любопытно, что важность выключения рессор сперва оспаривалась немец-

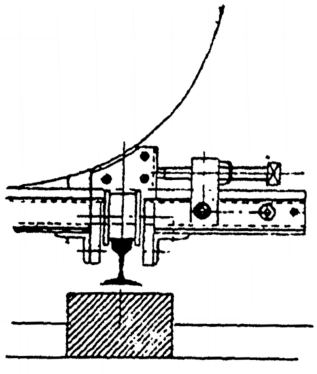
[1] Впервые напечатано в книге „Перевозка паровозов из-за границы“. Изд. Российской железнодорожной миссии в Берлине, 1923 (гл. IV). В январе 1922 г. академик А. Н. Крылов был назначен начальником морского отдела Российской железнодорожной миссии в Берлине. Одной из основных задач этого отдела являлось подыскание и приспособление купленных или зафрахтованных судов к транспортировке 900 паровозов с тендерами. В истории техники перевозка такого числа объектов весом каждый в 73 т в полностью собранном виде являлась делом совершенно новым. Предложенные Алексеем Николаевичем способы размещения и укрепления паровозов и переоборудования судов, подробно описанные в публикуемой главе, обеспечили полную безопасность всей операции при наименьших затратах средств и времени. — *Ред.*

кими и некоторыми русскими инженерами, но была по интуиции правильно оценена Ф. Я. Игнатенком, который, вопреки распоряжениям



Фиг. 1. Укрепление паровозов на палубе.

своего непосредственного начальника, на свою ответственность, остановил погрузку первых паровозов с действующими рессорами, хотя и не знал о соответственном распоряжении, задержавшемся на почте.



Фиг. 2. Колодка под колесом.

Что касается способа укрепления паровозов на палубе, то он в идее был нами позаимствован с паромов Сасниц—Тралеборг и без всяких комментариев ясен из фиг. 1. Колодки, которые подкладывались под колеса, показаны, кроме того, на фиг. 2. Надежность этого крепления и безопасность самого расположения паровозов на палубе была блестяще доказана первым же переходом „Одина“ из Гамбурга в Петроград (24 сентября 1921 г.), совершенным в довольно бурную погоду. Во время этого перехода в виде опыта была описана полная циркуляция в 360°, причем розмахи судна достигали 35° на сторону.

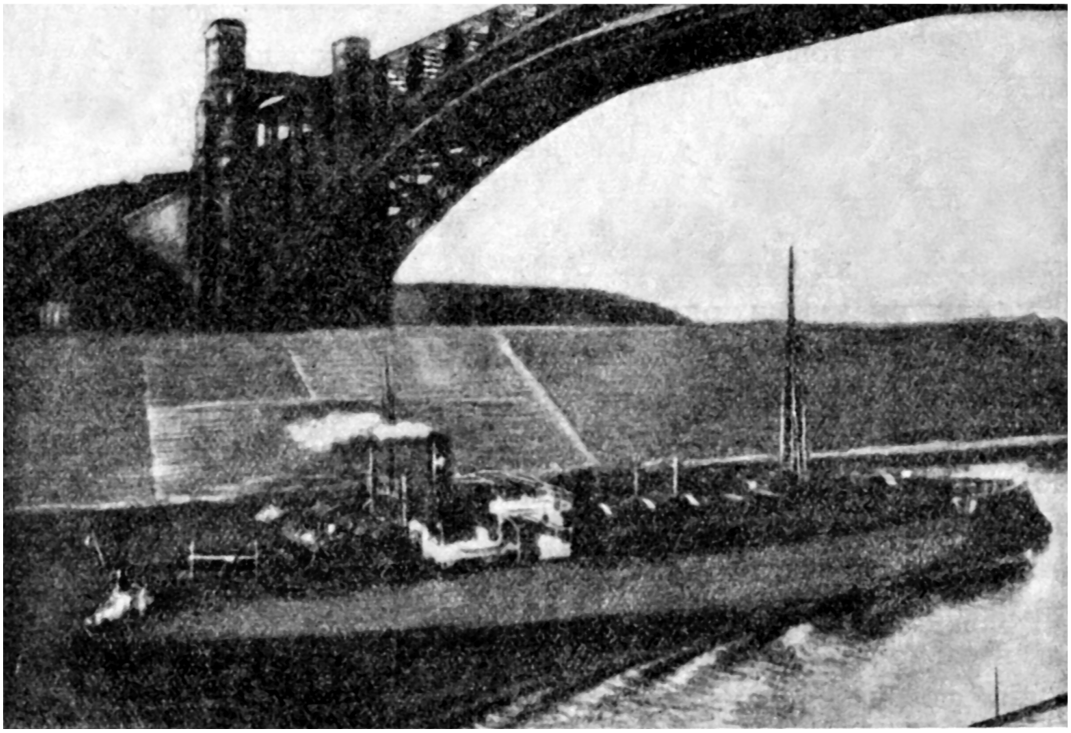
Во время первого рейса паровозы на „Одине“ были покрыты брезентами, но потом это оказалось излишним.

Всего на „Одине“ помещалось 9 паровозов и 9 тендеров.

На фиг. 3 приведена фотография, снятая с „Одина“ с 9 паровозами на палубе во время прохождения им Кильского канала. Зрелище, представляющееся даже для опытного моряка довольно необычным.

2. Дальнейшая фрахтовка судов Дерутрой

„Один“ был зафрахтован Дерутрой по особому договору. Фирма предлагала и другие свои суда, но, приняв дело перевозок в свои руки,



Фиг. 3. „Один“ в Кильском канале.

Дерутра от чужих услуг решила отказаться и в качестве эксперта по морским делам пригласила автора.

Сразу стал вопрос: покупать или фрахтовать суда? Ввиду новизны дела, а главное, страшной спешки, Дерутра остановилась сперва на фрахтовании на условиях так называемого „time charter“. Условия эти, т. е. условия найма парохода на срок, были выработаны международным соглашением судовладельцев на „Baltic and White Sea Conference 1912“, причем по соглашению между нанимателем и владельцем парохода в них могут вноситься необходимые по обстоятельствам дела изменения, если только они не затрагивают интересов третьих лиц (страховых обществ, экипажа и пр.). По time charter, пароходовладелец представляет нанимателю свой пароход в совершенно исправном состоянии на определенный срок для перевозки грузов между портами указанных в чертерпартии морей. Страхование парохода лежит на обязанности владельца. Оплата

жалования экипажа и продовольствие его производятся за счет владельца. Уголь, смазочные материалы, вода для котлов, сборы: портовые, лоцманские, маячные, за проход каналами, за буксиры причальные и консульские, за погрузку, выгрузку, взвешивание грузов и пр. оплачиваются нанимателем. Краны для подъема и погрузки грузов, вес коих свыше 2 т, средства для укрепления грузов в трюме и на палубе — оплачиваются нанимателем.

Кроме этих главнейших в нормальных условиях чартера (чартерпартия) приведены пункты, определяющие отношения капитана к нанимателю, сдачи парохода, оплаты аварии и т. п., перечислять которые здесь нет надобности. Плата за пароход при time charter исчисляется помесячно за каждую тонну валовой грузоподъемности парохода (dead weight).

На таких условиях и были зафрахтованы Дерутрой суда „Каприно", „Тайнмаус" и „Чалистер". При фрахтовании их приходилось руководствоваться следующими данными и соображениями:

1) паровозы предстояло грузить в трюм парохода вполне собранными, не отнимая никаких частей;

2) между смежными рядами паровозов надлежало оставлять такие зазоры, чтобы было удобно закладывать стропы и талрепа для укрепления их и был бы достаточно свободный проход для осмотра исправности этих креплений в плавании. Этот зазор был определен приблизительно в 10 дюймов, считая его между наиболее выдающимися частями паровоза;

3) между внутренними кромками наиболее высоких шпангоутов (рамовых) и наиболее выдающимися частями паровоза зазор был определен приблизительно в 2 дюйма;

4) при погрузке паровоза расстояние до боковых комингсов люков не должно составлять менее 12 дюймов и до поперечных не менее 18 дюймов и лишь в крайнем случае 12 дюймов;

5) если паровоз опускается в трюм между двумя другими уже стоящими на месте, то расстояние между наиболее выдающимися частями не должно быть меньше 18 дюймов.

Размеры паровоза были даны следующие:

Длина	12.70 м = 41′8″
Ширина	3.45 „ = 11′4″
Высота	5.25 „ = 17′3″
Вес	73.0 т

Размеры тендера:

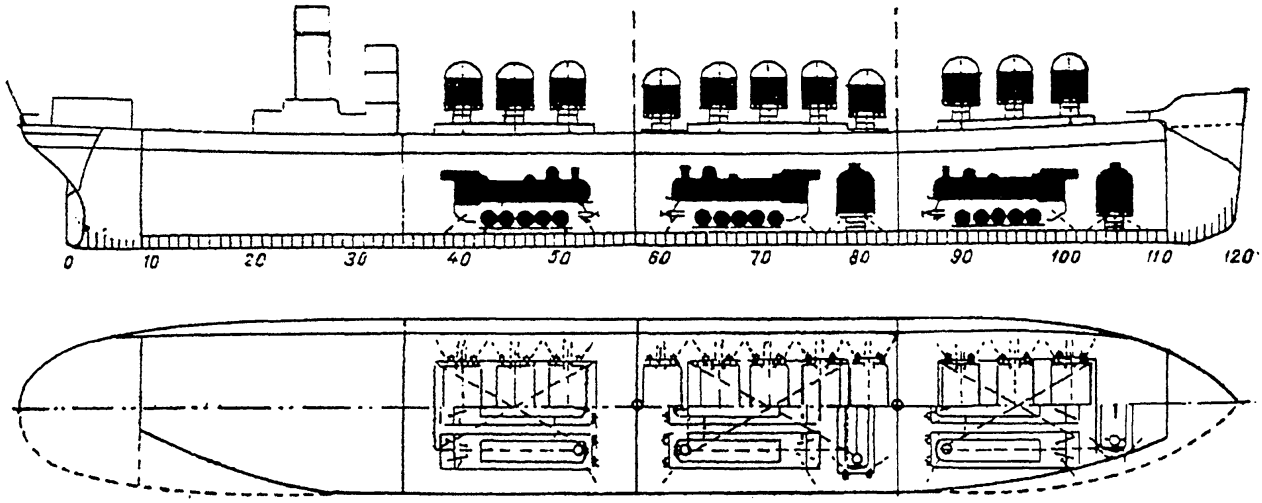
Длина	9.02 м = 29′7″
Ширина	3.25 „ = 10′8″
Высота	3.90 „ = 13′6″
Вес	23.0 т

На основании этих данных треб овалось, чтобы:

а) длина грузовых люков парохода была не меньше 43′8″ и

б) высота интрюма в чистом деле — не менее 19′6″, ибо к высоте паровоза надлежало присовокупить высоту рельса и брусьев под ним. При этом, если только пароход не имел машины в корме, то эта высота в кормовом трюме должна была быть над коридором гребного вала.

Эти требования чрезвычайно ограничивали выбор судов, пригодных для перевозки паровозов, и делали его весьма и весьма трудным. В самом деле, обычный тип грузового парохода имеет машину посредине и по два грузовых трюма в носу и в корме. Трюмы отделяются друг от друга непроницаемою переборкою, а также от машинного отделения и от носового и кормового пика. Таким образом, вдоль обоих кормовых трюмов



Фиг. 4. „Каприно".

идет коридор гребного вала, коего высота над внутренним дном 7 футов, ширина 5 футов и притом несимметрично: на один борт (большею частью правый) $3\frac{1}{2}$ футов, на другой $1\frac{1}{2}$ фута. Со стороны машины коридор имеет помещение упорного подшипника, так что его ширина составляет около 10 футов при высоте $8\frac{1}{2}$ футов и длине 12—15 футов.

Длина грузовых люков обыкновенно значительно меньше требуемой для погрузки паровозов; поэтому, чтобы использовать все трюмы, надо или переделывать все 4 люка, или же вырубать переборки между грузовыми трюмами.

Само собою разумеется, что при фрахтовании парохода приходилось считаться с тем, что по окончании фрахтования владелец потребует приведения парохода в первоначальный вид, и, значит, все переделки надо считать вдвойне, и стоимость их целиком ложится на фрахт, поэтому выбирались такие пароходы, кои можно было приспособить с возможно небольшими переделками.

3. „Каприно“

Первым из указанных пароходов был зафрахтован „Каприно“ (фиг. 4). Главные его размерения суть:

Длина между перпендикулярами	305′
Ширина наибольшая	47′
Высота до палубы	24′
Машина в корме.	
Грузовых трюмов	3
Грузоподъемность	5300 т
Длина трюмов:	
носового	66′
среднего	69′
кормового	66′

Каждый трюм имеет свой люк длиной 42′, шириной 24″.

Для погрузки паровозов пароход не требовал никаких переделок, а только временные устройства в трюме для их установки, и кроме того козлы над люками на палубе для установки тендеров (фиг. 5, 6).

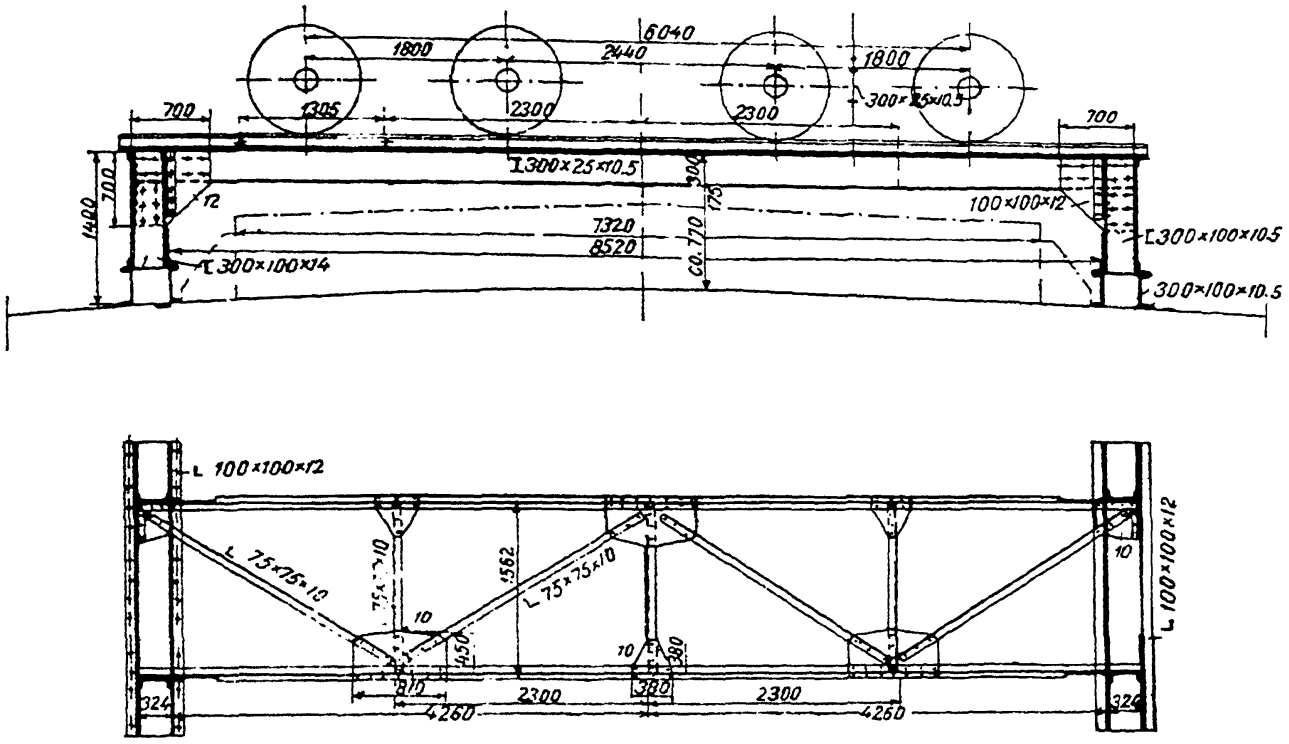
На этом пароходе размещалось 11 паровозов: по 4 в среднем и кормовом трюме и 3 в носовом, причем 3 паровоза ставились в ряд продольно, 4-й же — поперек парохода.

Пароход этот был зафрахтован 10 сентября 1921 г. на срок 6 месяцев с правом продления еще на 6 месяцев по цене 10 шиллингов за тонну d. w. в месяц, т. е. по 2650 фунтов стерлингов в месяц.

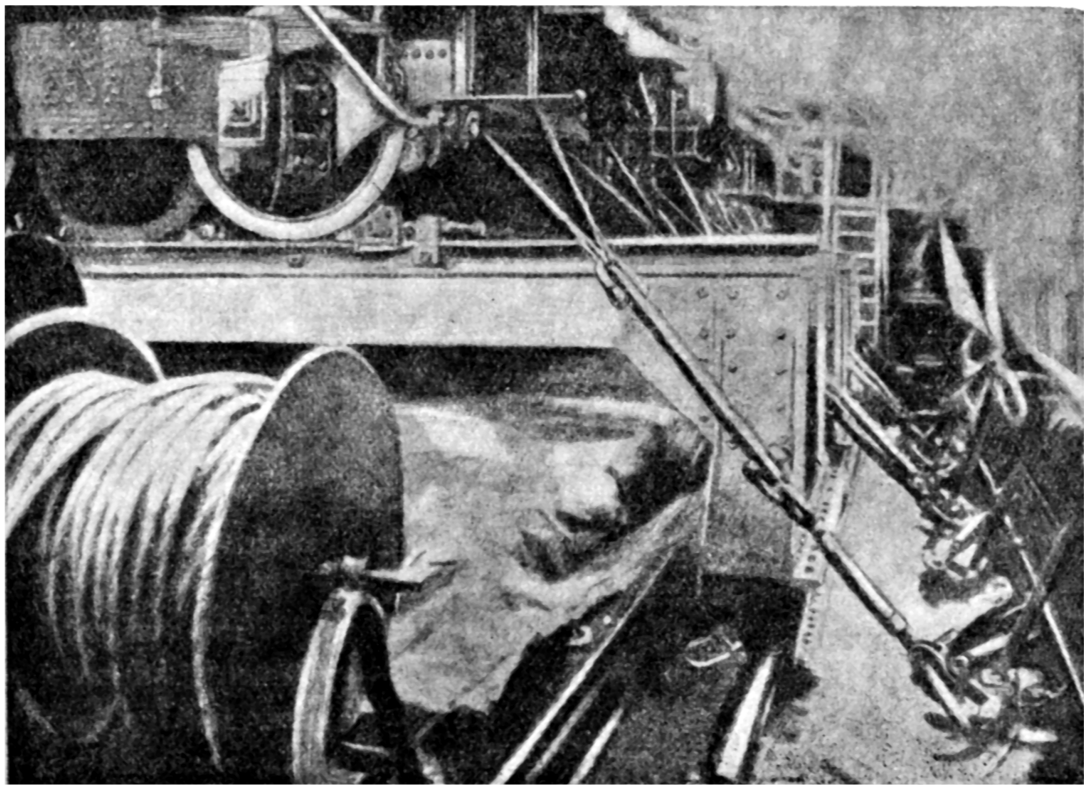
4. „Тайнмаус“

Вторым пароходом, который был зафрахтован Дерутрой, был „Тайнмаус“ (фиг. 7 и 8). Главные размерения его:

Длина между перпендикулярами	321′
Ширина наибольшая	43′
Высота до палубы	25′3″
Машина посредине.	
Грузовых трюмов	3
Грузоподъемность	3920 т
Углубление	19′
Грузовых люков	4
Размеры их:	
длина 1-го	42′6″
длина 2-го	42′9″
длина 3-го	39″6′
длина 4-го	38′3″
при ширине	29′6″

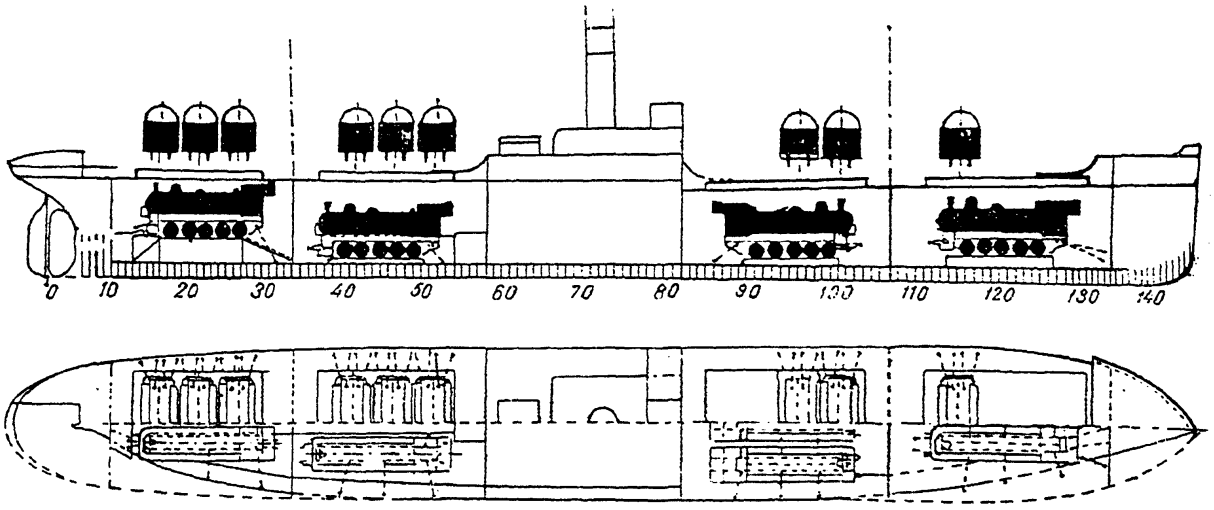


Фиг. 5. „Каприно“. Козлы над люками.



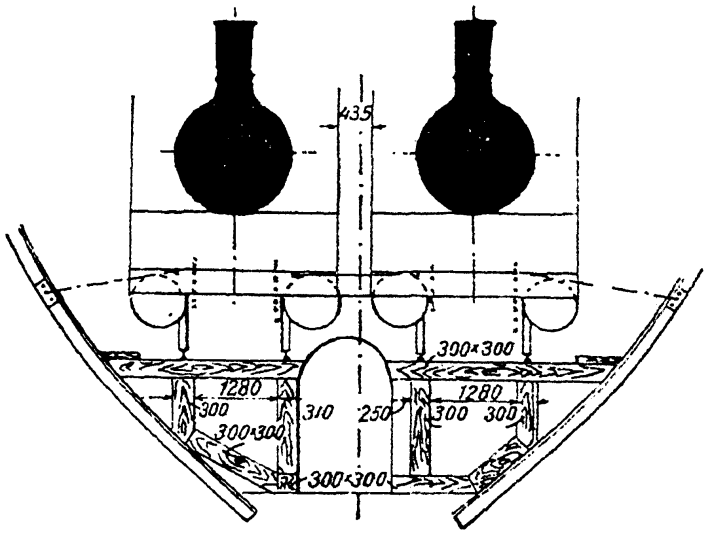
Фиг. 6. Укрепление тендеров на козлах.

Носовые трюмы разделены друг от друга съемною деревянною перегородкою, также и кормовые, так что в сущности пароход имеет только



Фиг. 7. „Тайнмаус".

два грузовых трюма. Тип парохода, так называемый „Self trimming coallier". Этот пароход также требовал сравнительно небольших переделок для своего приспособления под перевозку паровозов в трюме и тендеров на палубе, причем тендера располагались на съемных козлах над люками. Пароход принимал 9 паровозов и 9 тендеров и был зафрахтован 13 сентября 1921 г. сроком на 6 месяцев с правом продления фрахтования по цене 9.5 шиллингов за тонну d. w., по 1862 фунта стерлингов в месяц.



Фиг. 8. Поперечный разрез „Тайнмауса".

5. „Чалистер"

Третьим Дерутрой был зафрахтован пароход „Чалистер". Главные размерения его:

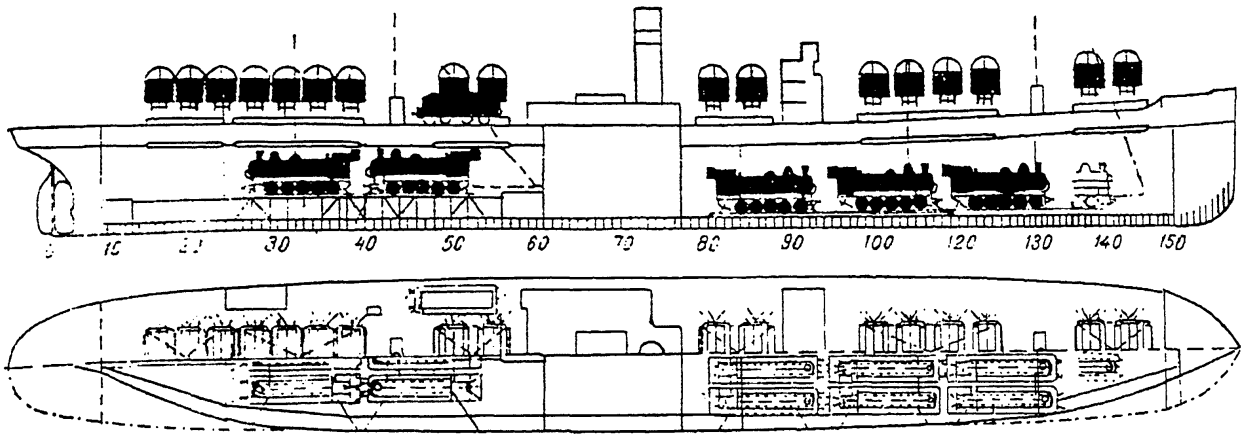
Длина между перпендикулярами	425′
Ширина наибольшая	54′6″
Высота до главной палубы	28′6″

Машина посредине.

Грузовых трюмов 4
Грузоподъемность d. w. . . . . 9600 т
Грузовых люков 4

Размеры их соответственно:

27′×20′; 51′×20′; 27′×20′; 27′×20′.



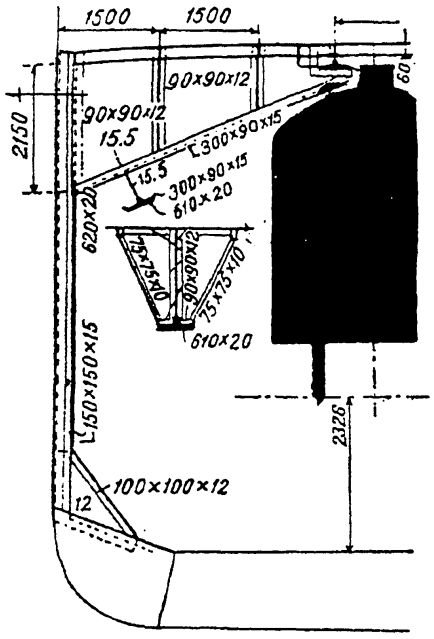
Фиг. 9. „Чалистер".

Грузовые трюмы отделены друг от друга водонепроницаемой переборкою. Пароход двупалубный.

Он вмещал 18 паровозов в трюме и 18 тендеров на палубе (фиг. 9).

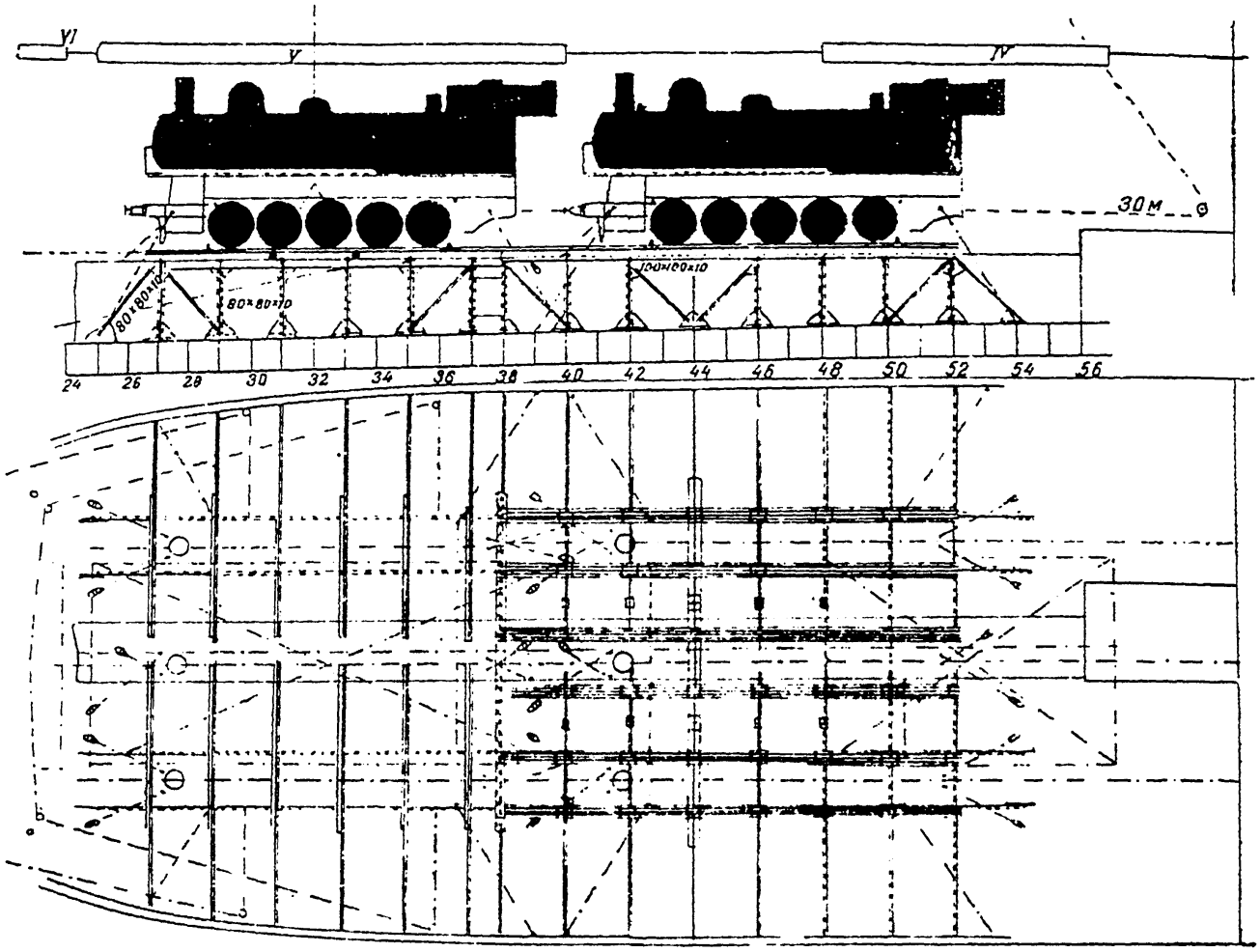
Хотя „Чалистер" и требовал сравнительно много переделок, но владелец парохода согласился участвовать в стоимости их до суммы в 2000 фунтов стерлингов, причем время переделок выключалось из фрахтования и оплаты. Указанная сумма покрывала собою бóльшую часть расходов, а так как по своим размерам пароход являлся подходящим, то он и был зафрахтован 8 октября 1921 г. на 6 месяцев с правом продления по цене 9.5 шиллингов в месяц за тонну d. w.

Для возможности вместить в „Чалистер" 18 паровозов и 18 тендеров, в нем пришлось прорубить 3 водонепроницаемых переборки и целый ряд пиллерсов. Это, в свою очередь, вызвало со стороны Британского Ллойда требование поставить, для придачи корпусу судна необходимой жесткости, вместо пиллерсов ряд дополнительных консолей, изображенных на фиг. 10.

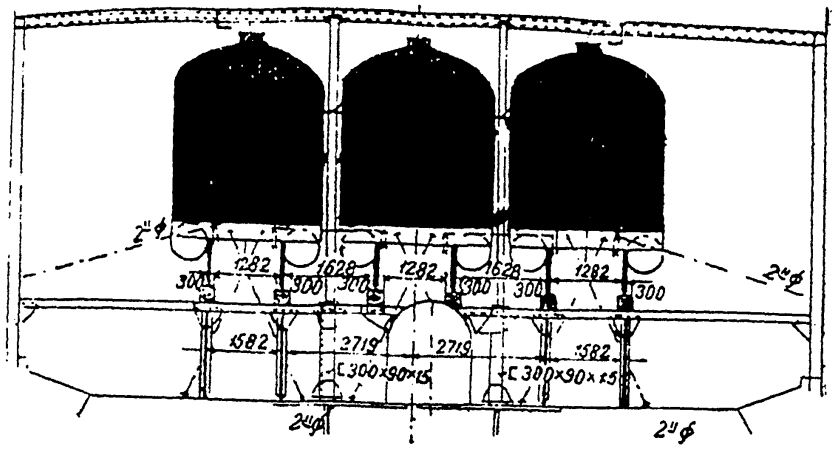


Фиг. 10. Консоли в районе 12-метрового люка.

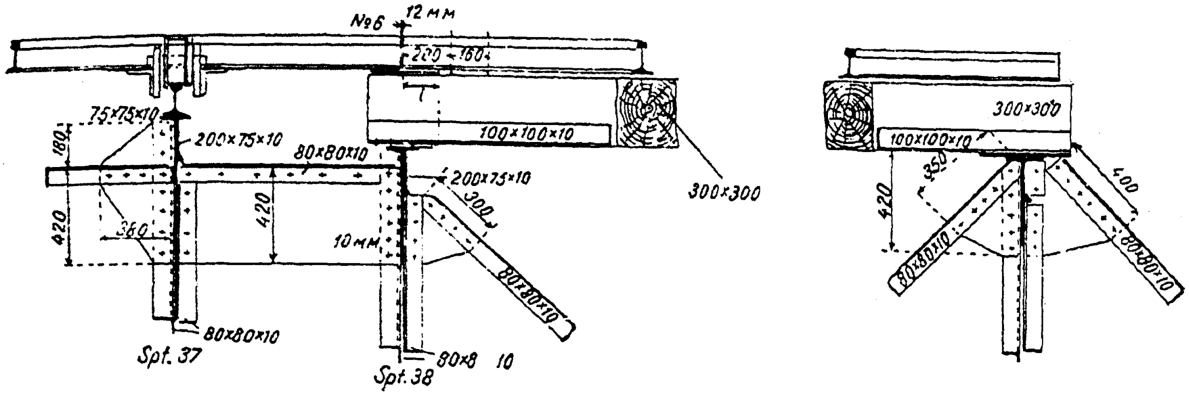
На фиг. 11—13 приведены наиболее интересные детали устройств и укреплений в кормовой части. Фиг. 14 показывает вид трюма „Чалистера"; на ней хорошо видны пути, а также платформа со стоящим на ней под люком паровозом.



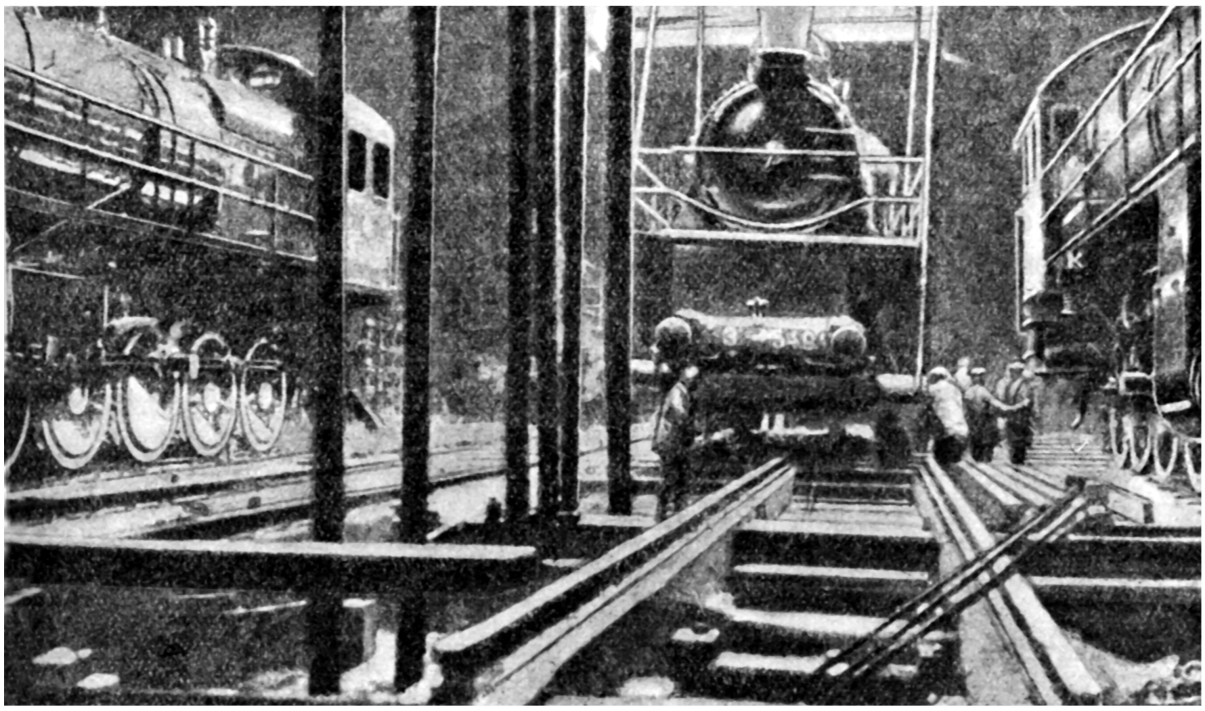
Фиг. 11. Установка паровозов в кормовом трюме.



Фиг. 12. Кормовая часть. Поперечный разрез.



Фиг. 13. Детали укреплений.



Фиг. 14. В трюме „Чалистера".

6. Паромы. „Таинственная гавань"

В числе судов, предложенных для перевозок паровозов, находились также специальные паромы, построенные для перевозки железнодорожных поездов в полном составе из Англии на континент.

Эти паромы имеют следующие размерения:

Длина	350′7″
Ширина наибольшая	58′9″
Углубление при полном грузе	8′
Машин	2
Общая длина путей	1100′

Паром подходил кормою к пристани и на него при помощи подъемного моста вкатывался поезд.

Для перевозки наших паровозов эти паромы оказались маловыгодными; так как гавани прибытия и отправления не оборудованы ковшами для таких паромов со специальными подъемными мостами, то нам пришлось бы все равно грузить на них паровозы кранами. Это раз. Во-вторых, стоимость перешивки всех путей на них на русскую колею требовала значительных затрат. В-третьих, наших паровозов они вмещали всего 12, а фрахт за них требовали очень высокий: 4500 фунтов стерлингов в месяц.

Зато осмотр этих паромов дал автору возможность посетить порт Ричбороу, известный под названием „the mistery harbour" — таинственная гавань.

Дело в том, что во время войны англичане для перевозок через канал устроили в устьях речки Стур, находящихся в 6 верстах к югу от Рэмсгейт, специальный порт, превосходно оборудованный путями, кранами и всякими погрузочными средствами, со множеством барж и буксиров, складами, бараками для войск и т. п.; к этому оборудованию относятся и упомянутые выше паромы. Все портовые здания — одноэтажные, их стены и крыши окрашены под общий фон низменной ровной местности и таким образом замаскированы.

Военная тайна соблюдалась англичанами столь строго и внимательно, что существование этого порта немцам во время войны известно не было, над портом зачастую пролетали аэропланы, летевшие метать бомбы в Лондон, где эти бомбы поражали мирных жителей, не нанося существенного военного вреда, и ни одна бомба не была сброшена в Ричбороу.

Замечательна дальнейшая судьба этого порта: со всем его имуществом и оборудованием по окончании войны он был назначен в продажу с торгов. Его купил город Квинбороу, опасаясь конкуренции, и, купив, решил его уничтожить, т. е. порт закрыть, все оборудование частью перевезти к себе, частью распродать, большую часть плавучих средств распродать, бараки продать на слом. Таким образом, и паромы предлагались или в продажу, или в наем. Одно время ими пользовались для перевозки прямых вагонов с цветами и фруктами из Франции в Англию, но кажется это дело не пошло.

7. Покупка судов

Уже осенью 1921 г. стало ясным, что перевозка паровозов в собранном виде не представляет собой ничего опасного и экономически наиболее выгодна. С другой стороны, не менее ясным стало, что тремя судами: „Один", „Каприно" и „Тайнмаус", даже при наметившихся тогда

опозданиях германских паровозных заводов, справиться нельзя. Постановлением СНК от 23 августа 1921 г., решено было купить два парохода. Приискание пароходов было поручено автору этих строк.

При выполнении этого поручения, кроме тех соображений, которыми приходилось пользоваться при фрахтовании судов, при покупке надо было стараться еще: во-первых, чтобы при возможно меньших размерах он вмещал наибольшее число паровозов, хотя бы для этого требовались и более значительные переделки, и, во-вторых, чтобы по окончании перевозки паровозов он легко бы был опять приспособлен к перевозке обыкновенных грузов.

Сопоставление размеров паровозов и обычных соотношений между главными размерениями грузовых судов показало, что для наивыгоднейшего использования трюмов важен каждый дюйм как по ширине, так и по длине паровоза.

Надо иметь в виду, что приискание судов совпало с тем периодом (23 августа 1921 г. — 4 февраля 1922 г.), когда перевозка паровозов находилась в совместном заведывании Дерутры и Миссии. Кроме того, им очень интересовались наркомвнешторг Красин и берлинский торгпред. В результате при бесчисленных сношениях между названными организациями происходили недоразумения, осложнявшиеся описками и ошибками стенографисток и телеграфистов, при которых „поручень“ превращался в „поршень“ и т. п.

Во всяком случае, первоначально автор получил категорическое требование Миссии, что паровозы должны грузиться в трюм без съемки с них частей, и в то же время были сообщены приведенные на стр. 232 размеры паровоза. Чертежи же были доставлены значительно позже.

Рассмотрение этих чертежей показало, что длина паровоза может быть уменьшена на 4 фута, если отнять козырек будки, который прикреплен несколькими болтами, что делает его отнятие делом нескольких минут. По ширине паровоза тоже можно выиграть несколько дюймов, если отнимать желобки над боковыми окнами будки; наконец, если отнимать буфера, чехол с контрштока, и ставить и закреплять поршни в крайнем заднем положении, то можно выгодать по длине паровоза еще около 12 дюймов.

Таким образом, размеры паровоза могут быть приведены следующим:

Длина	11.50 м = 37′8″
Ширина	3.25 „ = 10′8″
Высота	5.25 „ = 17′3″

После длительной переписки по разным инстанциям Миссия разъяснила, что к снятию козырька, поручней и желобков препятствий

с ее стороны никогда не встречалось. Отнятие же буферов вообще нежелательно и допустимо лишь в том случае, если благодаря этому можно поместить в данный пароход по крайней мере одним паровозом больше.

Останавливаясь на пароходах среднего (7000—8000 т d. w.) тоннажа и руководствуясь этими размерами паровоза и приведенными зазорами, видим, что ширина трюма парохода, вмещающего 4 паровоза в ряд, есть:

$$0.5+11+0.9+11+0.9+11+0.9+11+0.5=47.7'.$$

Считая рамовые шпангоуты по 24 дюйма, видим, что полная ширина парохода будет 52 фута; при такой ширине длина составит около 370 футов; все такие пароходы имеют машину посредине, и кормовой трюм будет стеснен коридором гребного вала, поэтому наибольшее число паровозов, которое в них можно вместить, составит от 18 до 20 и столько же тендеров на палубе. Грузоподъемность парохода таких размеров составляет около 7500 т при углублении около 25 футов. Эти размеры и углубление выгодны для дальнейшей эксплоатации при плавании между портами Балтийского и Черного морей и между Англией и портами этих морей.

Если бы пожелать вместить большее число паровозов, то надо было бы брать пароход, в трюме коего можно поместить по 5 паровозов в ряд. Ширина трюма такого парохода в чистом деле должна быть не менее 59.6 фута, значит, ширина парохода не менее 63.5 футов, длина его тогда около 450 футов, углубление в полном грузу 28—29 футов, грузоподъемность — около 10—12 тыс. т.

Выбор был остановлен на пароходах около 7500 т грузоподъемности.

Сообщив требования брокерам, вскоре получили ряд предложений пароходов подходящих размеров. Осмотр и обмеры их автором в большей части случаев обнаруживали, однако, какую-либо невыгоду, как, например, необходимость значительных переделок и подкреплений корпуса, недостаточную высоту кормового трюма, препятствующую ставить паровозы над коридором гребного вала, и т. д., изношенность корпуса, в особенности внутреннего дна. Все эти обстоятельства заставляли браковать пароход для намеченной цели и искать более выгодный и подходящий.

Всего автором было осмотрено около 30 пароходов, для чего пришлось посетить следующие порты: Лаут, Ньюкастль, Гулль, Гарич, Кингс-Линн, лондонские доки, Кардифф, Мильфорд, Barrydocks, Garston, Ливерпуль, Престон; многие из них по нескольку раз.

Все эти порты общеизвестны, лишь Мильфорд сравнительно редко посещается русскими моряками.

Мильфорд расположен на юго-западном побережье Англии при бухте того же имени, считающейся по своим размерам, полному закрытию, удобному входу, глубине воды и красоте местности одной из лучших в Англии.

Самый городок Мильфорд имеет, вероятно, тысяч пять жителей, кораблестроительный завод с сухим доком, другой завод, где производится разборка военных судов, проданных на слом.

Первый завод и док принадлежат фирме Виккерс. В день посещения автором, в доке стоял для окраски пароход Добровольного флота „Екатеринослав", взятый еще во время войны Англией для своих перевозок, кроме него на рейде стояло еще 5 пароходов того же флота.

Заведующим заводом оказался корабельный инженер Синклер, бывший долгое время представителем фирмы Виккерс в Петрограде и личный знакомый автора еще со времени постройки и испытаний крейсера „Рюрик". Проходя мимо завода, автор случайно встретился с ним, и Синклер любезно предложил съездить на его автомобиле к месту производимых им, за отсутствием кораблестроительных, работ по постройке шоссейной дороги и дамбы.

Эти работы производились как раз у ворот того исторического парка, в коем расположена принадлежавшая Нельсону вилла, в которой он провел последние годы своей жизни вместе с леди Гамильтон и откуда он выехал, чтобы принять командование флотом перед Трафальгарским боем.

После Нельсона имение перешло уже в третьи или четвертые руки; парк в порядке, вилла снаружи в том самом виде, как на старинных гравюрах, но имеет характер нежилой; прудок и бассейн, на коем, по преданию, Нельсон пускал модели кораблей (едва ли для простого баловства), спущен и зарос травой и бурьяном; в домике на берегу бухты со свешивающейся над водой террасой, с которой зимой и летом купался в бухте Нельсон, теперь живет сторож имения, а с нельсоновой террасы прачка полоскала в бухте белье.

Наконец брокеры предложили пароход „Маскинонж", для которого можно было видеть подробные чертежи. Обыкновенно у владельцев есть только чертеж общего размещения парохода в масштабе $\frac{1}{96}$ и чертеж поперечного сечения с показанием размеров связей в $\frac{1}{24}$. Этих чертежей для определения числа помещающихся паровозов недостаточно, и приходилось обмерять нужные поперечные сечения в носу и корме. Эти чертежи находились у Дж. Ишервуда, по системе которого пароход построен. Самый же пароход находился в это время на пути из Канады в Гамбург с полным грузом пшеницы.

Рассмотрение этих чертежей и спецификации показало исключительную прочность постройки парохода; то обстоятельство, что он только что прошел освидетельствование (survey) Ллойда, т. е. ремонт, указывало,

что корпус и механизмы в исправном и надежном состоянии, в котором еще более убеждало то, что пароход шел через океан осенью с полным грузом зерна, принятого на страх по нормальной премии. На основании этих данных автор рекомендовал купить пароход на ходу, с тем, чтобы по приходе в Гамбург он был введен в док и, если обнаружатся какие-либо повреждения, лишающие пароход класса, то таковые должны быть исправлены за счет владельца, а также должно быть пополнено все инвентарное, оговариваемое правилами Ллойда, имущество (якоря, канаты, буксиры, швартовы и пр.), если таковое окажется утраченным. На этих условиях пароход был куплен в начале ноября 1921 г. за 50 тыс. фунтов стерлингов и по приходе в Гамбург и осмотре в доке оказался в совершенно исправном состоянии, но в довольно неопрятном виде, так как на нем была команда, имевшая своеобразные представления о требованиях чистоты и гигиены.

8. „Маскинонж"

Главные размерения этого парохода суть:

Длина между перпендикулярами	374′10″
Ширина наибольшая	51′8″
Высота до главной палубы	30′ 9″
Машина посредине.	
Грузовых люков	10
Размеры их	17′34″
Грузовых трюмов	4
Грузоподъемность d. w.	7800 т
Углубление	24′ 6″

Пароход однопалубный. Грузовые трюмы отделены друг от друга двумя водонепроницаемыми переборками, кроме того в носовом трюме имелась переборка, отделяющая этот трюм от запасной угольной ямы.

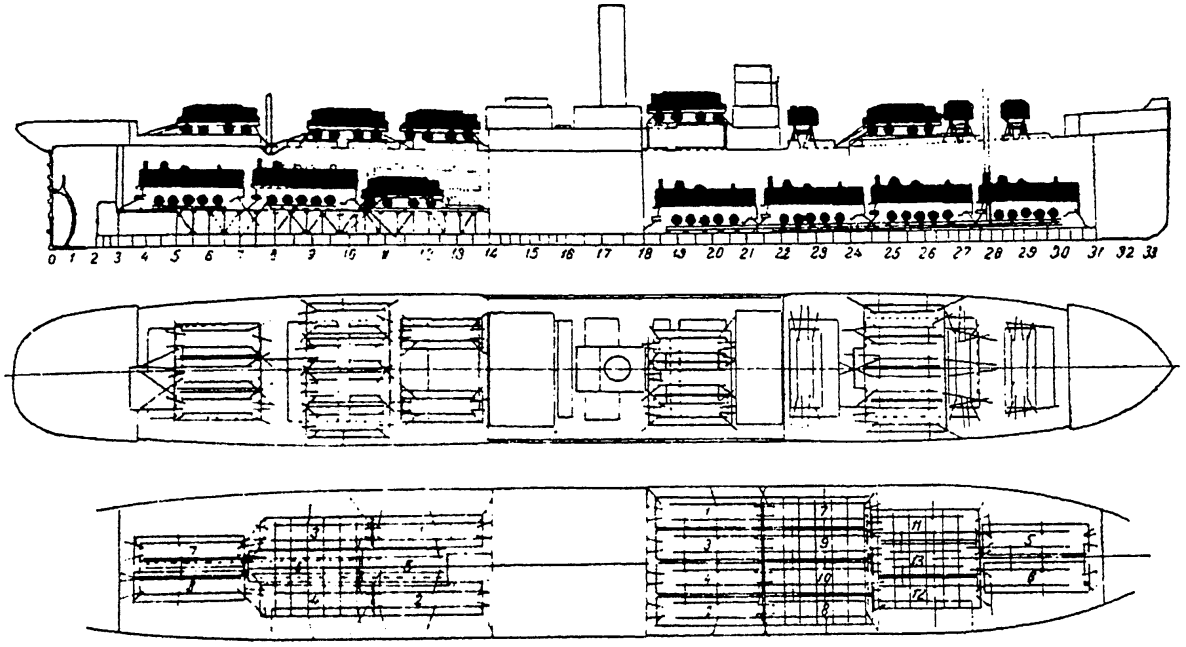
Он вмещал в себя 20 паровозов и 20 тендеров (фиг. 15).

Что касается переделок, которые в нем пришлось сделать, то об этом будет сказано в § 10.

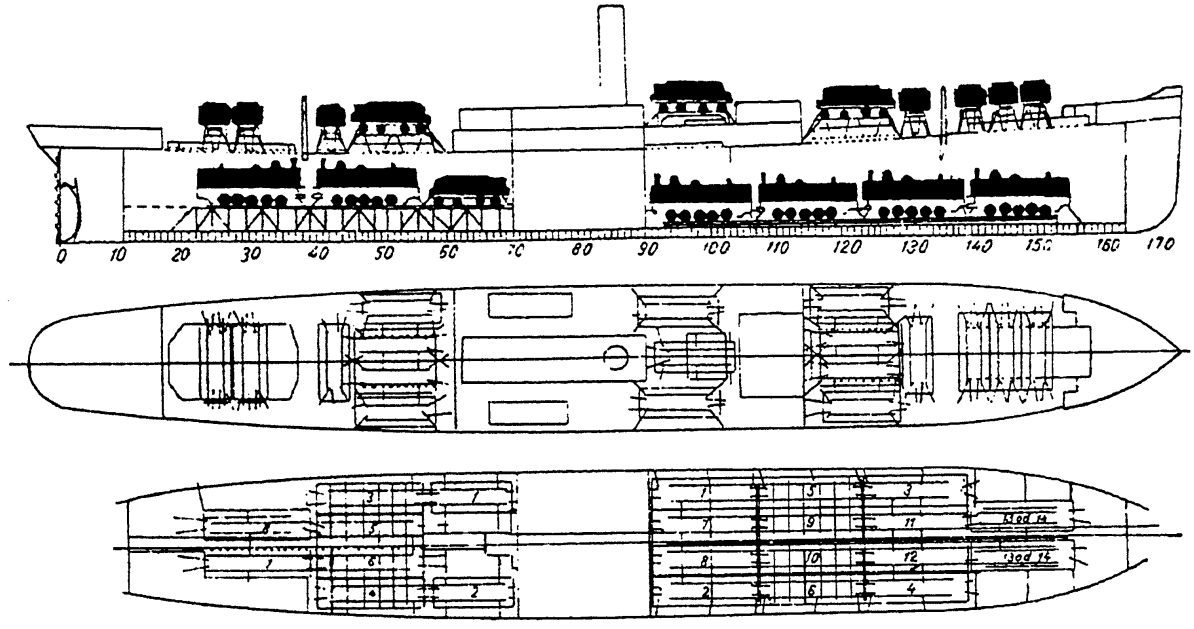
9. „Мендипренж"

Вскоре после покупки парохода „Маскинонж" тот же брокер предложил осмотреть пароход „Мендипренж", стоявший на рейде в Гарвиче. Осмотр и обмеры этого парохода показали прочность его постройки, исправное по всем частям состояние и полную пригодность для перевозки паровозов, коих он мог бы вместить 20 штук, и, так как цена

(52500 фунтов стерлингов) была признана Дерутрою приемлемой, то по получении телеграфного донесения автора об этом пароходе, не до-



Фиг. 15. „Маскинонж".



Фиг. 16. „Мендипренж".

жидаясь получения подробного его описания и данных осмотра, было сообщено Лондонской торговой делегации распоряжение о покупке этого парохода (фиг. 16). Пароход был куплен в середине ноября 1921 г.

Главные размерения парохода „Мендипренж“ таковы:

Длина между перпендикулярами	385′
Наибольшая ширина	52′
Высота до палубы	29′6″
Машина посредине	
Грузовых трюмов, разделенных водонепроницаемыми переборками	4
Грузовых люков	4
Размеры их	27′ × 20′
Грузоподъемность	8020 т
Углубление	24′6″
Пароход однопалубный	

Немедленно по покупке пароход был направлен в Гамбург.

Приобретением пароходов „Маскинонж“ и „Мендипренж“ потребность в судах вполне покрывалась, и надлежало лишь приступить к устройству на них соответственных приспособлений для помещения паровозов и тендеров и к необходимым переделкам грузовых люков и трюмных переборок.

10. Приспособление судов

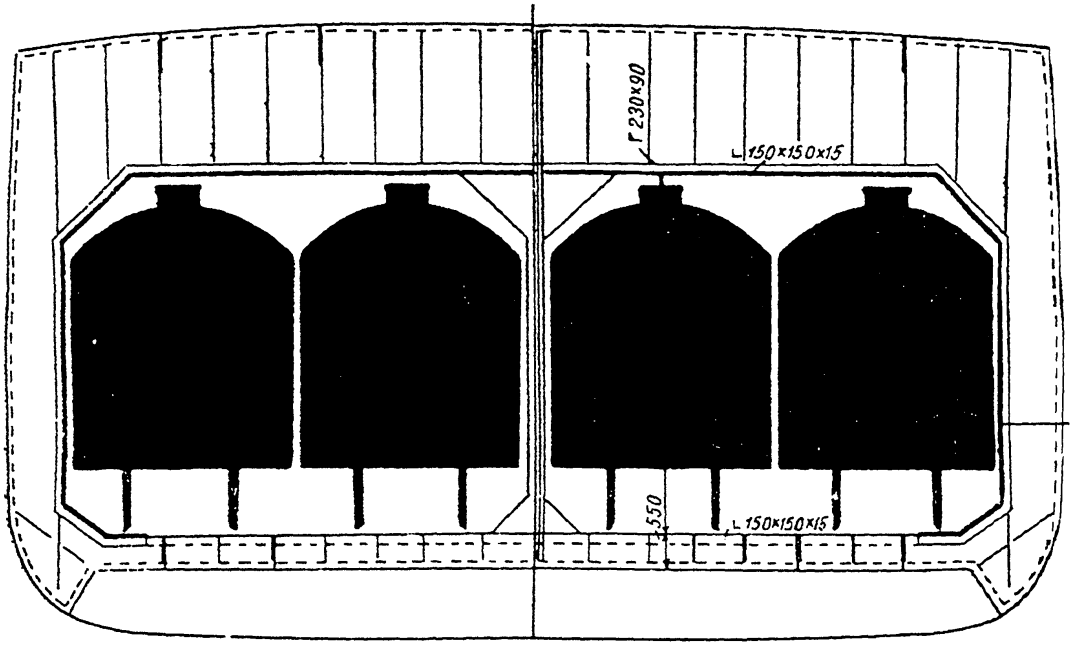
На пароходах „Тайнмаус“, „Чалистер“, „Маскинонж“ и „Мендипренж“ приспособления для установки паровозоз в трюме по сути своего устройства одинаковы и различаются лишь в деталях, вызываемых местными обстоятельствами, останавливаться на которых нет надобности. Поэтому здесь приводится описание устройств одного из пароходов, являющееся типичным.

Чтобы не терялось место по длине, оба носовых трюма соединяются в один, с вырубкой разделяющей их переборки. Совершенно так же и оба кормовых трюма соединяются в один. Но переборка служит не только для разделения трюмов. Она является также и одною из главнейших поперечных связей корабля, поэтому, вырубая ее, необходимо, восстановить крепость, что достигается тем, что переборка вырубается не целиком, а только посредине, причем по бортам, палубе и днищу часть ее оставляется в виде выступающего ребра на сколько, на сколько это позволяет размещение и передвижение паровозов. Это оставшееся ребро усиливается приклепкою угольников и планок так, что из него образуется прочный, солидного профиля, рамовый шпангоут.

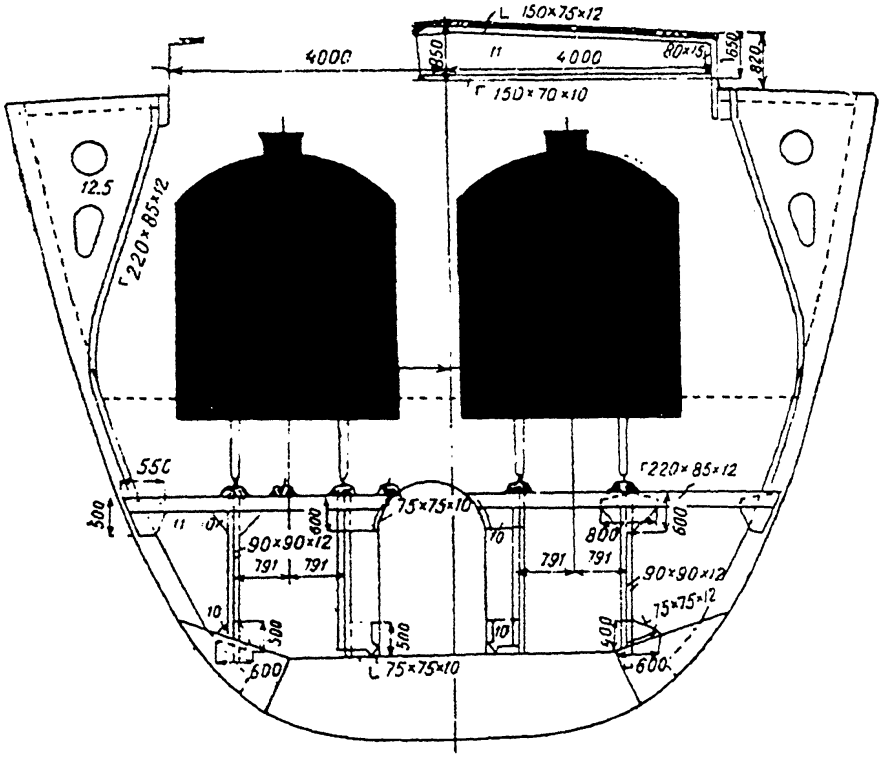
Сказанное хорошо поясняется фиг. 17, относящейся к „Мендипренж“.

Грузовой люк для погрузки паровозов нужен для каждого трюма только один, но достаточных размеров. Этого мы достигли удлинением крайнего носового и крайнего кормоваго люков до 40—42 футов. Укрепление палубы в районе кормового люка на „Мендипренж“, сделанное по требованию Ллойда, показано на фиг. 18.

По днищу в носовом трюме прокладываются 4 железнодорожных пути, по которым паровозы прокатываются до своего места в трюме,



Фиг. 17. Вырез переборки на „Мендипренж".

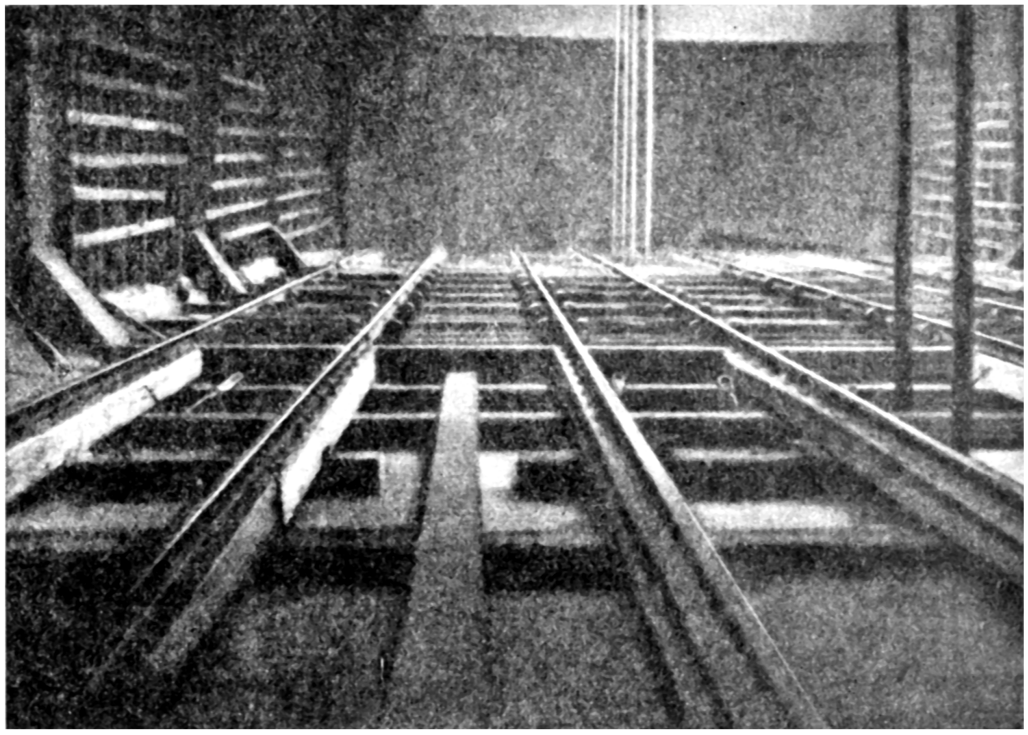


Фиг. 18. Кормовая часть „Мендипренж".

на коем и укрепляются стропами и винтовыми талрепами к рымам (кольцам), приклепанным к днищу. Под люком прокладываются пути поперек корабля, и по ним катаются передаточные платформы. При нагрузке паро-

воз опускается краном на передаточную платформу, которая для приема его ставится под срединою люка. Затем платформа перекатывается вместе со стоящим на ней паровозом поперек корабля, пока рельсы платформы не станут в продолжение рельсов соответствующего пути, на который тогда паровоз и перекатывается с платформы. Сказанное хорошо поясняется фиг. 19 и 20, представляющими фотографии трюмов наших кораблей.

В кормовом трюме устройство по сути то же, с разницею лишь в том, что пути проложены на уровне верха коридора гребного вала, а не непо-

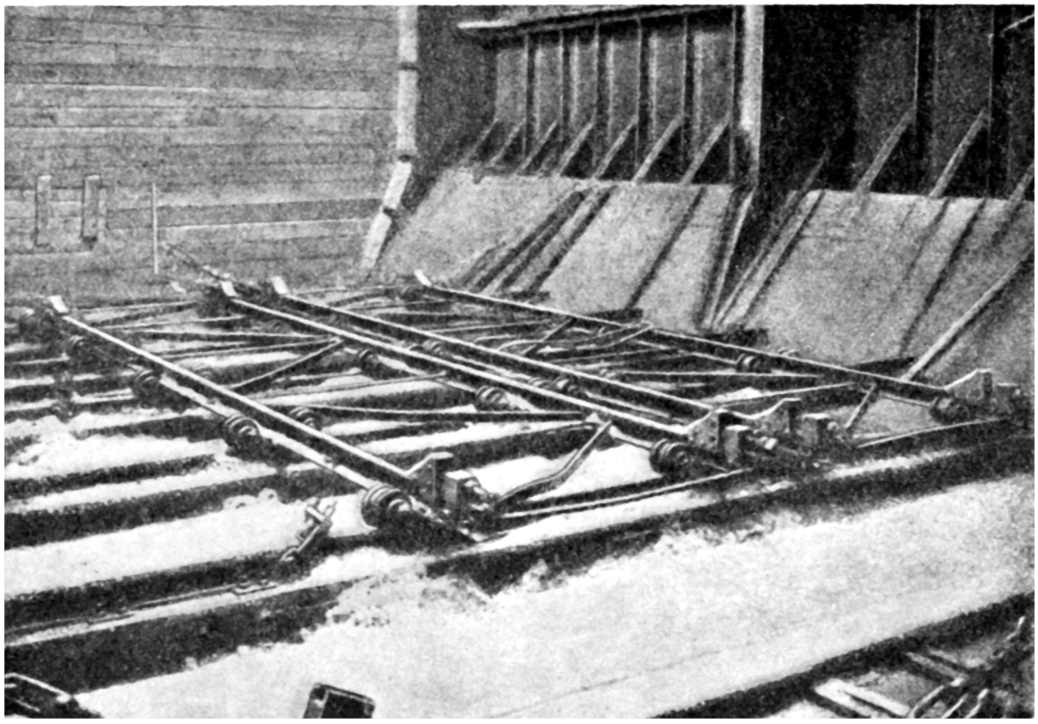


Фиг. 19. „Мендипренж". Пути в трюме.

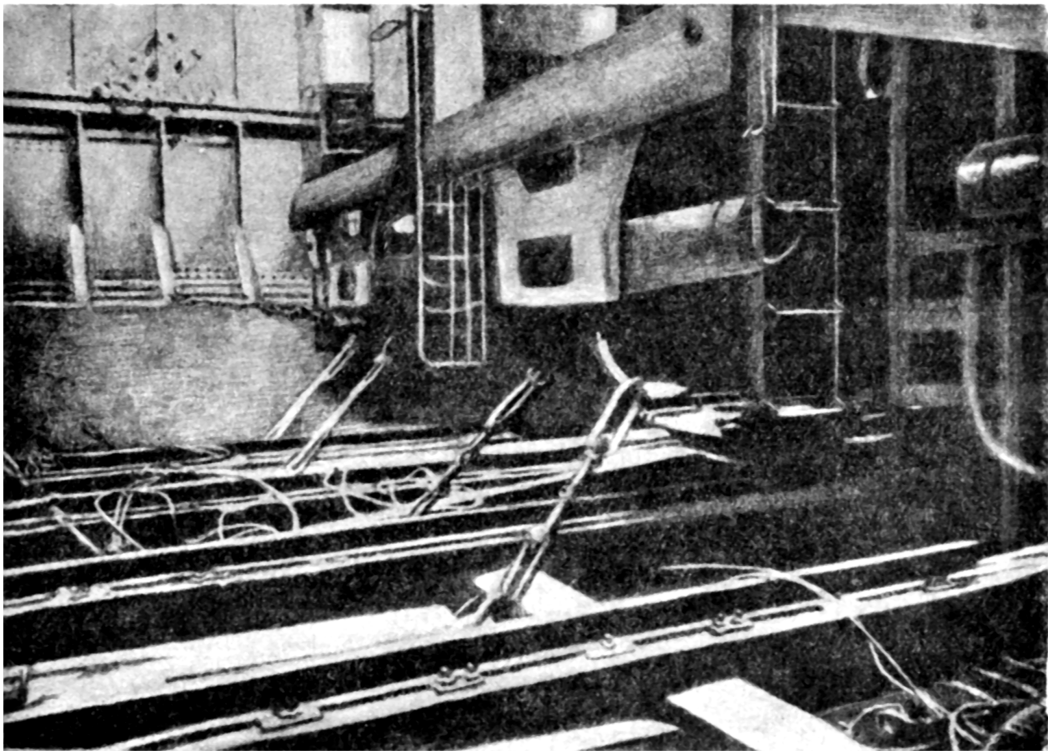
средственно по внутреннему дну парохода. Самые пути делаются значительно прочнее, нежели обыкновенно, и рельсы кладутся по продольным деревянным лежням квадратного сечения в 12 × 12 дюймов (фиг. 13 и 14). Эти лежни перевязываются между собой и распираются к нижним концам шпангоутов поперечными брусьями такого же сечения, проложенными через каждые 8 футов.

Чтобы не нарушить чеканки и водонепроницаемости внутреннего дна, ни лежни, ни поперечные балки к дну не крепятся. Между собою рельсы того же пути связываются стяжными болтами через каждые 8 футов.

Для укрепления паровозов на своих местах, к днищу приклепаны рымы (кольца) по 8 штук для каждого паровоза: за эти рымы (фиг. 21) закладываются гаки 2-дюймовых винтовых талрепов, коими и натягиваются втугую проволочные стропы, закладываемые за раму паровоза в передней и задней ее части.

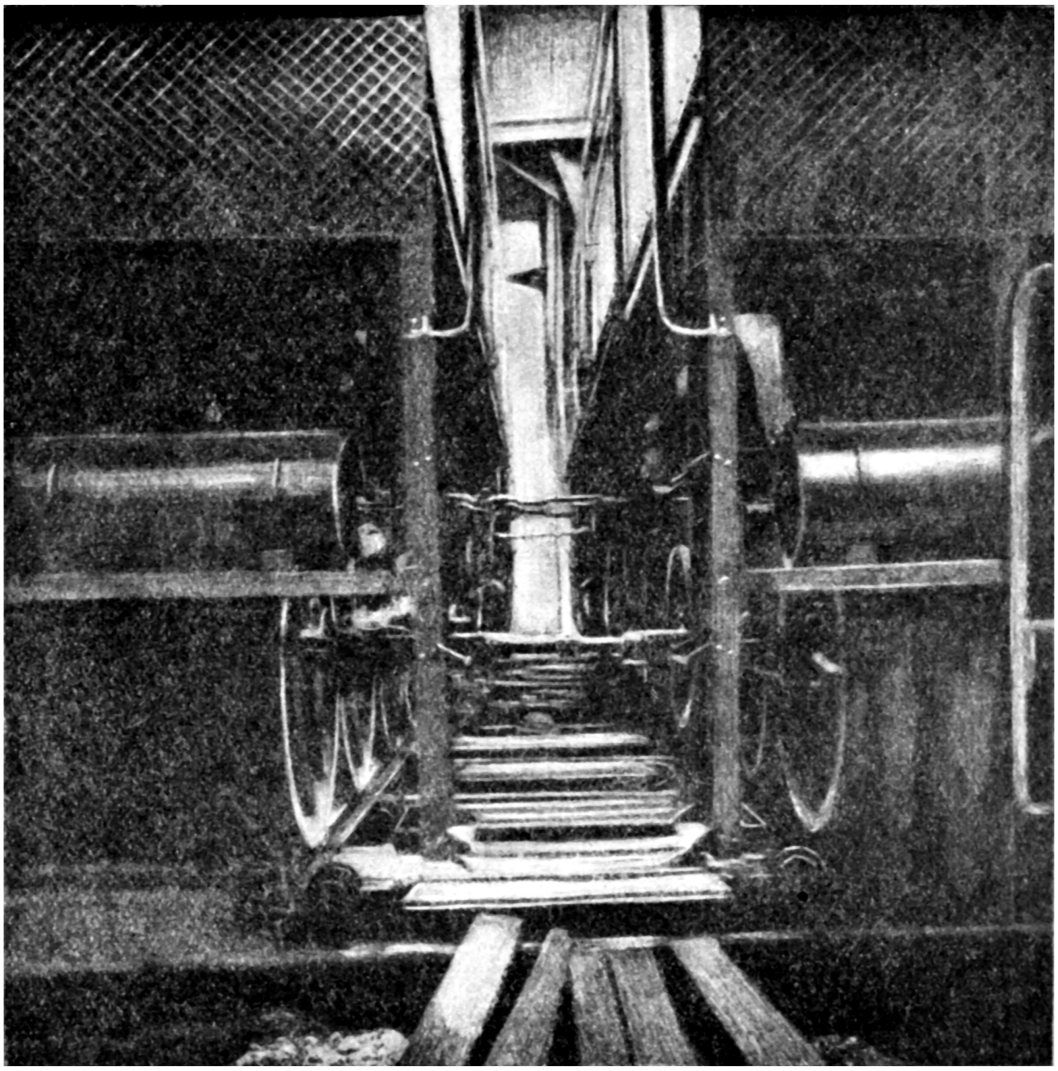


Фиг. 20. „Мендипренж". Передаточная платформа.



Фиг. 21. Укрепление паровозов в трюме.

Кроме этих найтовов, крепящих паровоз к днищу, под колеса его закладывались стопора, укрепляемые болтом к рельсу (фиг. 1) и между паровозами одного ряда клался найтов проволочного троса, взятый за рамы паровозов против их поперечных брусьев (фиг. 22). Этим найтовом паровозы связывались между собою, крайние же крепились к борту

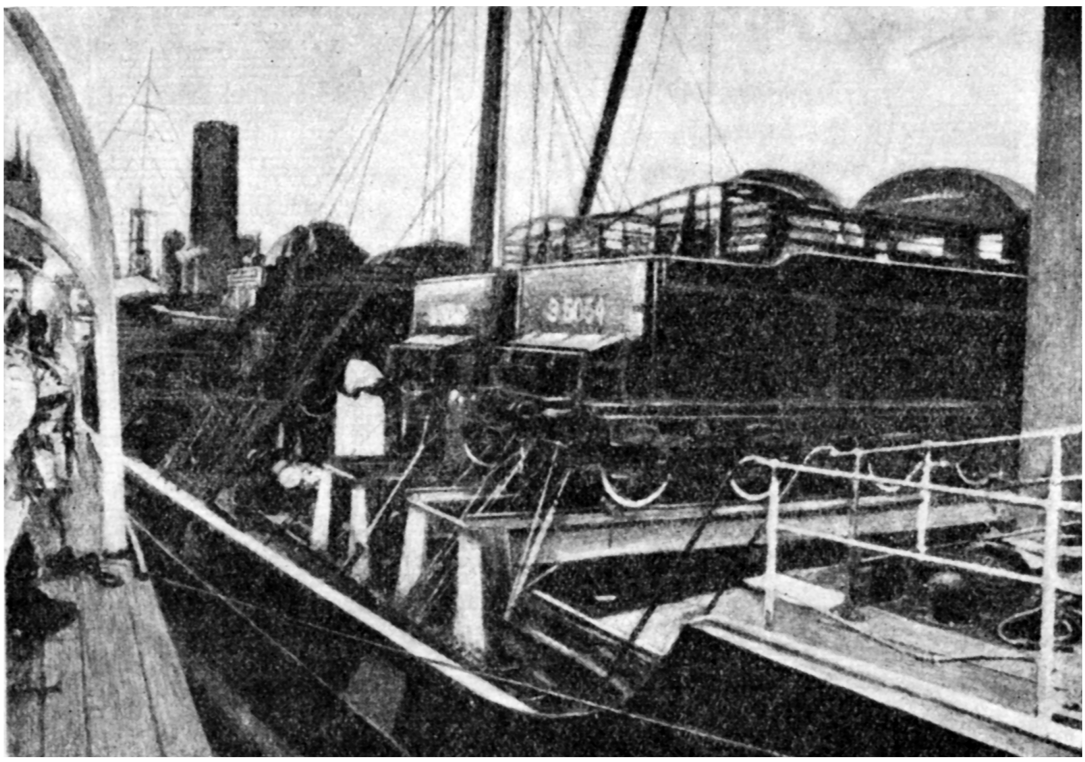


Фиг. 22. Укрепление паровозов между собою.

за скобы, взятые в проушины, к борту для того приклепанные. Эта система найтовов, стопоров, вместе с ребордами колес препятствовала паровозу получать какое-либо смещение во время качки, скрепляя его намертво с кораблем. Чтобы тяга найтовов не передавалась на рессоры, они замертвлялись стальными 2-дюймовыми прокладками, вкладываемыми между рамою и буксовою коробкою в то время, когда паровоз висел под краном, и, значит, рессоры были свободны от нагрузки. Понятно, что после того, как паровоз ставился на рельсы, весь вес передавался на эти прокладки

и раму, а не на рессоры, и вместе с тем паровоз на них не мог иметь никакой „игры“ во время качки.

Для установки тендеров на палубе пароходов были устроены особые съемные козлы, которые ставились и прикреплялись болтами к приклепанным к палубе балкам коробчатой стали. Устройство этих козел и установка на них тендеров показана на снимке (фиг. 23) и на чертежах (фиг. 5). Вообще все козлы были одинакового устройства для всех судов, отличаясь лишь некоторыми деталями соответственно местным условиям.



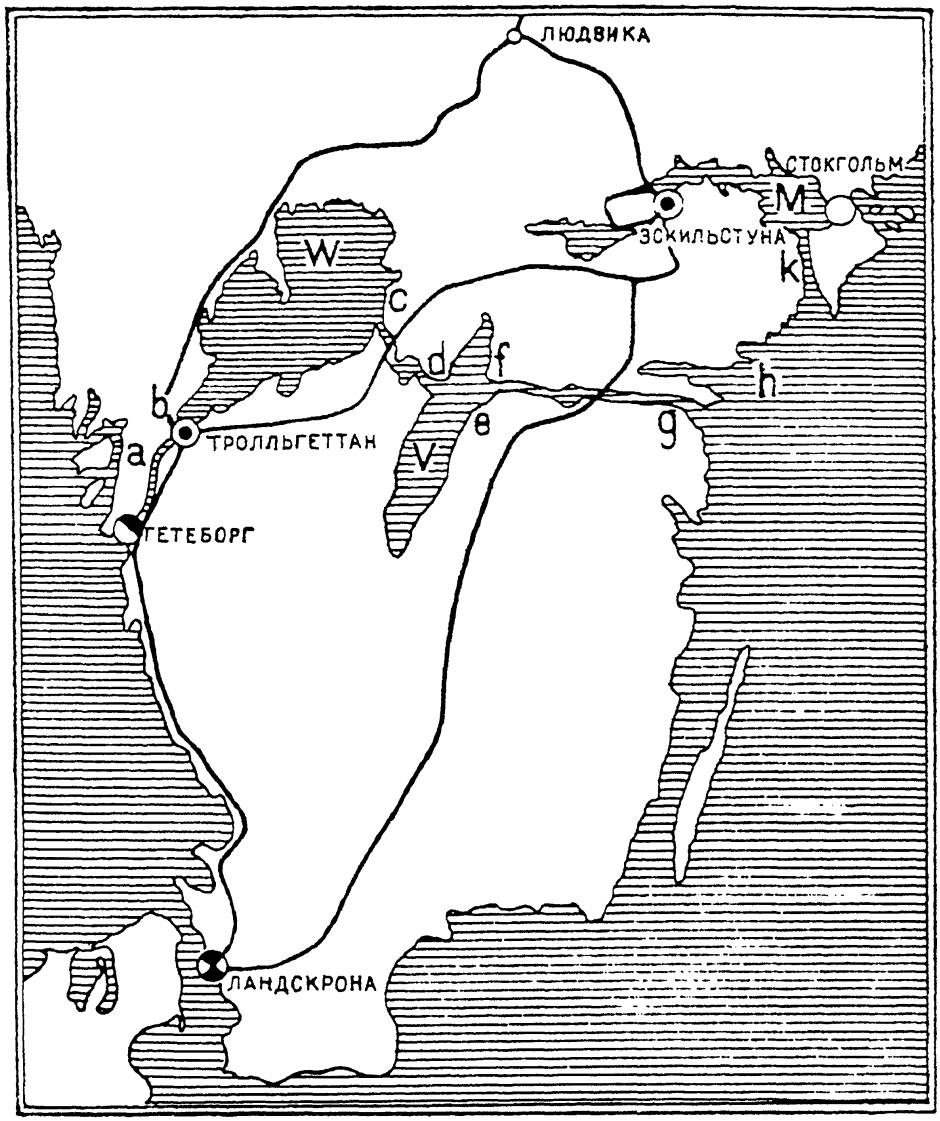
Фиг. 23. Укрепление тендеров на палубе.

11. Особенности перевозки шведских паровозов

Все паровозы $Э^{m}$ строятся в Тролльгетане, а большинство тендеров в Эскильстуне (фиг. 24).

Как Тролльгетан, так и Эскильстуна расположены на той системе внутренних водных путей Швеции, которая составляет так называемый Готский канал и простирается от Гэтеборга на Категате до Стокгольма на Балтийском море (фиг. 24).

От Гэтеборга до Тролльгетана путь идет по р. Гэта, глубина которой 8—12 м, при ширине фарватера около 40—60 м. Лишь при местечке Лилла Эдетт (*a*) на реке почему-то оставлено неуглубленное место протяжением метров 50 с глубиною воды 4.20. Примерно в полукилометре



Фиг. 24. Схема путей и Готского канала.

выше этого места расположен первый шлюз с подъемом около 8 м. Размеры шлюзной камеры:

Длина	90.0 м
Ширина в воротах	13.5 „
Глубина на пороге	5.5 „

По правилам судоходства по каналу к проходу через такие шлюзы допускаются суда, коих наибольшие размерения не превышают следующих величин:

Длина	87.0 м
Ширина	12.5 „
Углубление	4—4.20 м (смотря по стоянию воды в реке, что зависит от направления ветра).

От Лилла Эдетт до Тролльгетана путь идет тою же рекою с такою же глубиною и шириною фарватера до шлюзов, расположенных километрах в 2 ниже города. Этих шлюзов четыре, размеры такие же, как приведено выше. Последний шлюз выходит прямо в оз. Окерше, на берегу коего и была затем устроена погрузочная пристань. Выше оз. Окерше, параллельно реке просечен в гранитных скалах канал длиною около 3 км; на берегу этого канала расположены как завод, так и самый город Тролльгетан, на реке же устроена каменная плотина и электрическая станция в 170 000 л. с., использующая падение реки в 35 м, образовывавшее прежде знаменитый Тролльгетанский водопад.

Река Гэта вытекает из оз. Веннерн (*W*), километрах в 8 от Тролльгетана. Эта часть реки также приведена в судоходное состояние, но на всем дальнейшем пути до Стокгольма имеется множество шлюзов, размеры коих допускают только суда, коих размерения не превышают:

Длина	32.0 м
Ширина	7.0 „
Углубление	2.8 „

Оз. Веннерн глубоководное, длиною около 150 км, шириною около 60, путь на нем от Веннерсборга (*b*) до Шьеторпа (*c*) идет открытым плесом, на котором ветром из северной половины компаса разводит крупную волну, особенно значительную для таких малых судов, коими поддерживается сообщение по этому пути.

От Шьеторпа (*c*) до Каресборга (*d*) путь идет шлюзованной рекою и небольшими озерами на протяжении около 50 км. От Каресборга (*d*) до Вадстена (*e*) открытый плес в 25 км поперек глубоководного оз. Веттерн (*V*). От Вадстена (*e*) через Муталу (*f*) до Седеркопинга (*g*) путь идет около 90 км небольшими озерами, рекою со множеством шлюзов и выходит в Балтийское море, шхерными фарватерами коего идут через Окселезунд (*h*) до Седерталье (*k*), откуда по оз. Мелларн (*M*), мелководному с бесчисленным множеством островов идет путь на восток в Стокгольм и на запад в Эскильстуну. Расстояние от Эскильстуны до Тролльгетана по железной дороге 330 км, по описанному водному пути 535 км.

Из вышеприведенного общего описания сообщений и местоположения заводов видно, что задача о перевозках сама собою распадается на две части: перевозка собственно паровозов и перевозка тендеров.

По отношению к перевозке паровозов представлялись три возможности:

а) доставлять паровозы на шведских скатах до отправного порта, в коем производить смену скатов и окончательную сборку: паровозы в собранном вполне виде грузить на пароходы и отправлять прямо в Петроград, а если лед не позволит, то в Виндаву или Ревель;

б) паровозы в собранном вполне виде грузить в Тролльгетане на малые пароходы или лихтера, могущие проходить рекою до Гэтеборга, на этих судах доставлять их до отправного порта, где перегружать на большие пароходы для дальнейшего следования в Россию;

в) в Тролльгетане грузить на пароход, могущий проходить шлюзы, паровозы; тендера же или грузить на этот же пароход в Тролльгетане, или доставлять их в другой попутный порт, в коем этот пароход забирал бы их при своем следовании в Россию.

По отношению к тендерам представлялось возможным:

а) доставлять тендера в разобранном, на две части, виде (две тележки с рамой и бак) по железной дороге до отправного порта, здесь их собирать и грузить на пароход вместе с теми паровозами, к коим они принадлежат;

б) доставлять тендера по железной дороге в разобранном на две части виде в Тролльгетан, здесь их собирать; на малых пароходах или лихтерах доставлять в отправной порт, где перегружать на большие пароходы для дальнейшей отправки;

в) доставлять тендера водою или по железной дороге до попутного порта, куда за ними заходил бы пароход с паровозами;

г) доставлять по железной дороге или водою в Тролльгетан, где их в собранном вполне виде грузить на пароход для непосредственной доставки в Петроград или с перегрузкою в другом шведском отправном порту.

Как видно, для всех этих операций необходимо было прежде всего обеспечить возможность погрузки паровозов на пароход или лихтер в самом Тролльгетане, на что Миссия указывала еще в 1920 г., и каковая работа выполнена была в мае 1922 г.

12. Поиски парохода для Э^{m}

Само собою понятно, что наиболее дешевым и простым способом являлась перевозка паровозов и тендеров Э^{m} непосредственно на пароходе прямо из Тролльгетана в Петроград. Еще в декабре 1921 г. Дерутра просила автора этих строк приискать пароход, размеры коего допускали бы проход через шлюзы Тролльгетанского канала, причем сообщалось, что по мнению посланных Дерутрою экспертов для осмотра пути на месте, такой пароход может перевозить от 4 до 6 паровозов без тендеров.

Автор с этим заключением экспертов Дерутры не согласился, ибо, составив по главным размерениям:

Длина наибольшая	87.0 м
Ширина	12.5 „
Углубление	4.2 „

эскиз парохода, имеющего машину в корме, однопалубного, с палубою без уступа посредине, он убедился, что такой пароход может принимать 12 паровозов. Единственное затруднение состояло в приискании такого подходящего парохода на рынке. Вскоре после того автор вошел в состав Железнодорожной миссии, и ему было поручено, ознакомясь с Готским каналом и шлюзами на месте, приискать и купить для Миссии подходящий пароход.

При составлении плана размещения паровозов в трюме парохода нетрудно убедиться, что всякий дюйм в ширине парохода сверх допускаемых правилами судоходства 12.5 м является важным, или устраняя надобность в какой-либо переделке на пароходе, или давая возможность увеличить зазоры между паровозами и тем достигнуть более удобного их размещения и крепления.

Ввод парохода в шлюзную камеру по сути дела ничем не отличается от ввода его в сухой док, и автору по личному опыту был известен случай, когда громадные броненосцы „Андрей Первозванный" и „Павел I" пришлось вводить в один из кронштадтских доков, имея в воротах зазор всего по 3 дюйма на сторону, между тем по шведским правилам для шлюзов требовался зазор по 2 фута на сторону. Переговорами с дирекцией канала удалось получить разрешение проводить через шлюзы пароход, ширина коего до 13 м, но в длине никакой уступки сделано быть не могло, ибо дирекция считала увеличение длины опасным для ворот шлюзов, коих пароход мог бы коснуться штевнем и повредить их. После этого соглашения с дирекцией размеры парохода оказались:

Длина наибольшая	87.0 м = 285′5″
Ширина наибольшая	13.0 „ = 42′8″
Углубление	4.2 „ = 13′9″

и, как уже сказано, машина должна была быть в корме.

Пересмотрев регистр Английского ллойда, автор убедился, что из показанных в нем пароходов (об ним числом около 36 000) лишь около 200 являются подходящими по главным размерениям и расположению машины, но оставалось сомнение относительно большей части в достаточной на всем протяжении высоте трюма, которая требовалась в чистом деле не менее 19′3″.

Так как главный пароходный рынок есть Лондон, то 1 апреля 1922 г. автор был командирован в Англию с вышеупомянутым поручением. Сношения с брокерами показали, что подходящих пароходов на рынке весьма мало. Все пароходы так называемого „типа великих озер" в требовании и угнаны в Америку. На рынке оставались лишь следующие: „Водрил", „Нибинг", „Вэтерфильд". Первый из этих пароходов был в Престон, а второй в Сфа близ Туниса и был зафрахтован на Бордо, третий был на стоянке в Кингс-Линн.

Осмотр парохода „Водрил“ показал, что по размерам он подходящ, но требует по корпусу весьма значительных переделок (имел диптанк и трюмные бимсы, перевязанные карленсами), мог бы вместить 12 паровозов в трюм и 12 тендеров на палубу. Заявленная брокером цена была 30 тыс. фунтов стерлингов. Эта цена для парохода в 3200 т грузоподъемности по состоянию рынка представлялась высокой; тем не менее начаты были переговоры с предложенной автором цены в 20 тыс. фунтов стерлингов. Но владелец не только не принял этого предложения, но совсем снял пароход с рынка и потребовал его обратно в Америку, после того как он 18 месяцев пробыл на стоянке в Кингс-Линн. Это служит примером состояния рынка в то время для судов этого типа.

Другим характерным примером может служить случай с пароходом „Колорадо“. Этот пароход в середине марта был куплен на аукционе за 7 тыс. фунтов стерлингов. По размерам он являлся подходящим, и новый владелец был запрошен, не согласится ли он продать пароход. Владелец заявил, что он не намерен продавать парохода в Англии, а что отправил его уже в Америку, где и расчитывает его продать не менее, как за 30 тыс. фунтов стерлингов, каковой цены в Англии он за такой пароход выручить не может; и, действительно, в конце апреля пароход был продан в Канаде за 30 тыс. фунтов стерлингов. Точно так же незадолго перед тем шесть пароходов типа „озерных“ были из Франции все проданы в Америку.

Осмотр парохода „Вэтерфильд“ показал, что по размерам он подходящ и мог бы вместить 11 паровозов в трюме и 11 тендеров на палубе, но он имел поврежденное днище (страховое общество признало убыток до 4 тыс. фунтов стерлингов) и избитый множеством выбоин наружный борт между ватерлиниями в порожнем состоянии и в полном грузу. Кроме того, его внутреннее дно сильно оборжавело и представлялось ненадежным для крепления паровозов, так что потребовалась бы почти сплошная его смена. Такой крупный ремонт сверх ремонта, признаваемого страхователями, мог бы стоить около 10 тыс. фунтов стерлингов, почему автор предложил за этот пароход 6 тыс. фунтов стерлингов, между тем владелец (банк, за которым пароход остался после заклада) требовал 22 тыс. фунтов стерлингов, ибо под пароход была выдана в конце 1918 г. ссуда в 50 тыс. фунтов стерлингов, и банк и так нес громадный убыток. Ценою разошлись, и сделка не состоялась.

„Нибинг“ ожидался в Бордо около 15 апреля. Получив заранее французскую визу, автор немедленно по получении телеграммы о приходе парохода выехал в Бордо, где и осмотрел пароход, выгружавший в то время фосфаты.

Осмотр показал, что по своим размерам пароход может вместить в трюме 11 паровозов и на палубе 11 тендеров. Постройка парохода весьма прочная, с весьма рациональным распределением толщин листов палубной настилки, указывающим, что оно было сделано не по

простому механическому применению правил Британской корпорации, а на основании научных соображений. Такие отступления вполне естественны для завода, главная деятельность коего была сосредоточена на военном судостроении, и на котором в это время (1903) главным инженером был знаменитый Филипп Уотт, впоследствии директор военного судостроения Англии. Состояние парохода по корпусу, котлам и механизмам настолько исправное, что по осмотру ему никак нельзя было бы приписать возраст 19 лет, а примерно лет 10. Бо́льшую часть своей предыдущей службы пароход нес в Средиземном море и по западному берегу Африки к северу до экватора.

Телеграммою из Бордо автор рекомендовал Миссии немедленно выразить согласие на покупку парохода за назначенную владельцами цену 21 тыс. фунтов стерлингов с тем, чтобы пароход был сдан в Кардифе, куда он имел груз рудничной крепи (леса), и должен был притти около 15 мая. По осмотре в доке в Кардифе пароход и в подводной части оказался в полной исправности, был принят и отправлен в Гамбург для приспособления к перевозке паровозов и тендеров, куда он прибыл 27 мая 1921 г.

Чтобы справиться с предполагавшимися в то время перевозками в полном объеме (1000 паровозов), необходимо было приобрести еще один пароход. Дальнейшее обследование рынка показало, что имеется два весьма подходящих судна: пароход „Торонтерро“ и моторное судно „Примула“.

„Торонтерро“ — пароход постройки 1919 г. с турбиною с зубчатою передачей; котлы и машина в корме. Работал по берегам Испании. По своим размерам мог бы вместить 12, а может быть и 13 паровозов (последнее можно было бы определить только обмером с дела), но цена 42 тыс. фунтов стерлингов, указанная владельцем как крайняя, была неприемлема.

Теплоход „Примула“, построенный для итальянских владельцев, совершенно новый, по своим размерам мог бы вместить 13 паровозов, но владельцы были мало склонны к его продаже, цену запросили 60 тыс. фунтов стерлингов, и, кроме того, было сомнение в возможности получить разрешение итальянского правительства на перемену флага.

Кроме этих предлагалось множество других пароходов, но они по ближайшем рассмотрении даже общих чертежей оказывались мало подходящими, имея палубу с уступсм и вмещая 8 или 9 паровозов или и того менее.

Таким образом, европейский рынок был исчерпан. Запрос на американском рынке показал, что озерные пароходы были в требовании, и цена на пароход 10—20-летнего возраста стояла 150—160 тыс. долларов. Ввиду этого явилось предположение построить новый пароход, вполне приспособленный к нашим требованиям; автором были составлены эскизные чертежи и краткие спецификации такого парохода, и Миссией были

разосланы запросы восьми германским и двум английским заводам. Цены оказались почти одинаковы, около 40 тыс. фунтов стерлингов, и даже английские, вопреки ожиданию, немного ниже германских при более коротком сроке. Тем временем выяснилось, что договор с заводом подлежит изменению в смысле сокращения числа заказанных паровозов, и вопрос о втором пароходе сам собою отпал.

13. „Нибинг“

Приспособление „Нибинга“ под перевозку паровозов и тендеров было проектировано автором на тех же основаниях, как и для других пароходов, а именно: в носовой части два из имевшихся люков соединялись в один большой грузовой люк размерами 40′ длины и 26′ ширины; под этим люком устраивались перекатные платформы; впереди люка в трюме до переборки форпика прокладывались два пути и позади него три; переборка трюма вырезалась так, чтобы образовать прочный рамовый шпангоут; по палубе на всем протяжении от полубака до полуюта (около 160 футов по длине) и расстоянии около 14′ от диаметральной плоскости приклепывалось с каждой стороны по карленгсу из коробчатой стали $12'' \times 3\frac{1}{2}'' \times \frac{1}{2}''$, удвоенной на протяжении большого грузового люка. На эти карленсы ставились съемные, прикрепляемые болтами, козлы, на кои ставятся тендера в направлении поперек корабля. В носовой части от ватерлинии, соответствующей ходу порожнем (7 футов) до ватерлинии в полном грузу (16 футов) на протяжении около 70 футов по длине, обшивка была утолщена до $1\frac{1}{2}$ дюймов путем прокладки уравнительного и сверх его ледоходного поясов. Подсчет веса показал, что всего металла в подкреплениях требовалось до 125 т, тем не менее Германский ллойд потребовал дополнительных расчетов относительно подкрепления палубы в районе люков, и между автором и представителями Ллойда возникла по этому поводу переписка научного характера, выдержка из которой, представляющая некоторый теоретический интерес, дается в Приложении 2-м к этой статье.

Для пароходов „Мендипренж“ и „Маскинонж“, грузоподъемность коих соответственно — 8000 и 7800 т, нагрузка же всего около 2000 т, не могло и возникать вопроса о распределении водяного балласта, дифференте, углублении и остойчивости; по всем статьям был столь большой запас, что никаких предварительных подсчетов и соображений не требовалось.

С „Нибингом“ дело обстояло совершенно иначе. Главные размерения этого парохода следующие:

Длина наибольшая	256′
Длина между перпендикулярами	248′
Ширина наибольшая	42′
Углубление в полном грузу	18′
Грузоподъемность при этом углублении . .	3075 т

Водяной балласт:

форпик (шп. 126—116)	94 т
систерна № 1 (шп. 116—70)	280 „
систерна № 2 (шп. 70—48)	186 „
систерна № 3 (шп. 48—31)	100 „
систерна № 4 (шп. 31—15)	58 „
ахтерпик (шп. 15—1)	12 „

Нагрузка, которую ему предстояло принимать: 11 паровозов в трюм общим весом около 770 т с центром тяжести 15 футов над килем и 13 футов впереди миделя и 11 тендеров с ящиками паровозных принадлежностей и 5 т угля в каждом, общим весом 330 т с центром тяжести 30 футов над килем и 12.5 фута впереди миделя.

Имея машину в корме, пароход обладал в порожнем состоянии дифферентом около 8 футов на корму. Подсчет по обычным приближенным формулам и коэффициентам показывал, что, имея угля около 50 т и заполненным лишь форпик, можно надеяться, что с 11 паровозами и 11 тендерами пароход будет иметь предельную допускаемую осадку 13′ 10″ и небольшую, около 8—12 дюймов, метацентрическую высоту, достаточную для плавания рекою, а также, что, придя в Гэтеборг, он может принять и надлежащий запас угля (около 200 т) и столько водяного балласта, сколько надо для обеспечения остойчивости. Чтобы получить уверенность в этом деле, автор просил доставить теоретический чертеж парохода, дабы произвести полные вычисления его элементов и его остойчивости при углублении 14 футов, при коем ему предстояло плавать. Эти расчеты и их результаты даны в Приложении 3-м к этой статье.

По окончании приспособления парохода для перевозки паровозов и тендеров, исполненного в Гамбурге, пароход в июле вышел в Тролльгетан. Предполагалось, что первою погрузкою паровозов и первым рейсом по каналу должен руководить автор, который и должен был с этой целью выехать в Тролльгетан.

Между тем Миссией была получена из Гэтеборга тревожная телеграмма, что пароход задержан в Гэтеборге и не допущен к следованию в Гэта Эльф. Подобная же телеграмма была получена и Дерутрою с прибавлением, что причиной задержки служит избыточная против допускаемых правилами ширина парохода. Между тем, как сказано выше, автором еще до покупки парохода было получено согласие дирекции канала на пропуск судна шириною до 13 м, т. е. 42′8″, тогда как ширина „Нибинга“ была 42′ 0″. Ясно, что происходило какое-то недоразумение или несвоевременное осведомление низших исполнителей о решении высшей инстанции. Вскоре дело разъяснилось: для взимания сборов и вообще для плавания по Готскому каналу требуется специальное мерительное свидетельство, подобно тому как для Суэцкого и Панам-

ского каналов, составляемое или утверждаемое дирекцией канала. „Нибинг“ такого свидетельства при первом рейсе не имел, и вся задержка была вызвана необходимостью произвести надлежащие обмеры и расчеты согласно правилам для составления мерительного свидетельства для Готского канала, администрация коего не только не чинила никаких препятствий, но проявила особенную любезность и предупредительность, ибо „Нибинг“ был наибольшим пароходом, когда-либо проходившим через канал в шлюзы.

Фиг. 25 дает наглядное представление о прохождении „Нибингом“ шлюзов.

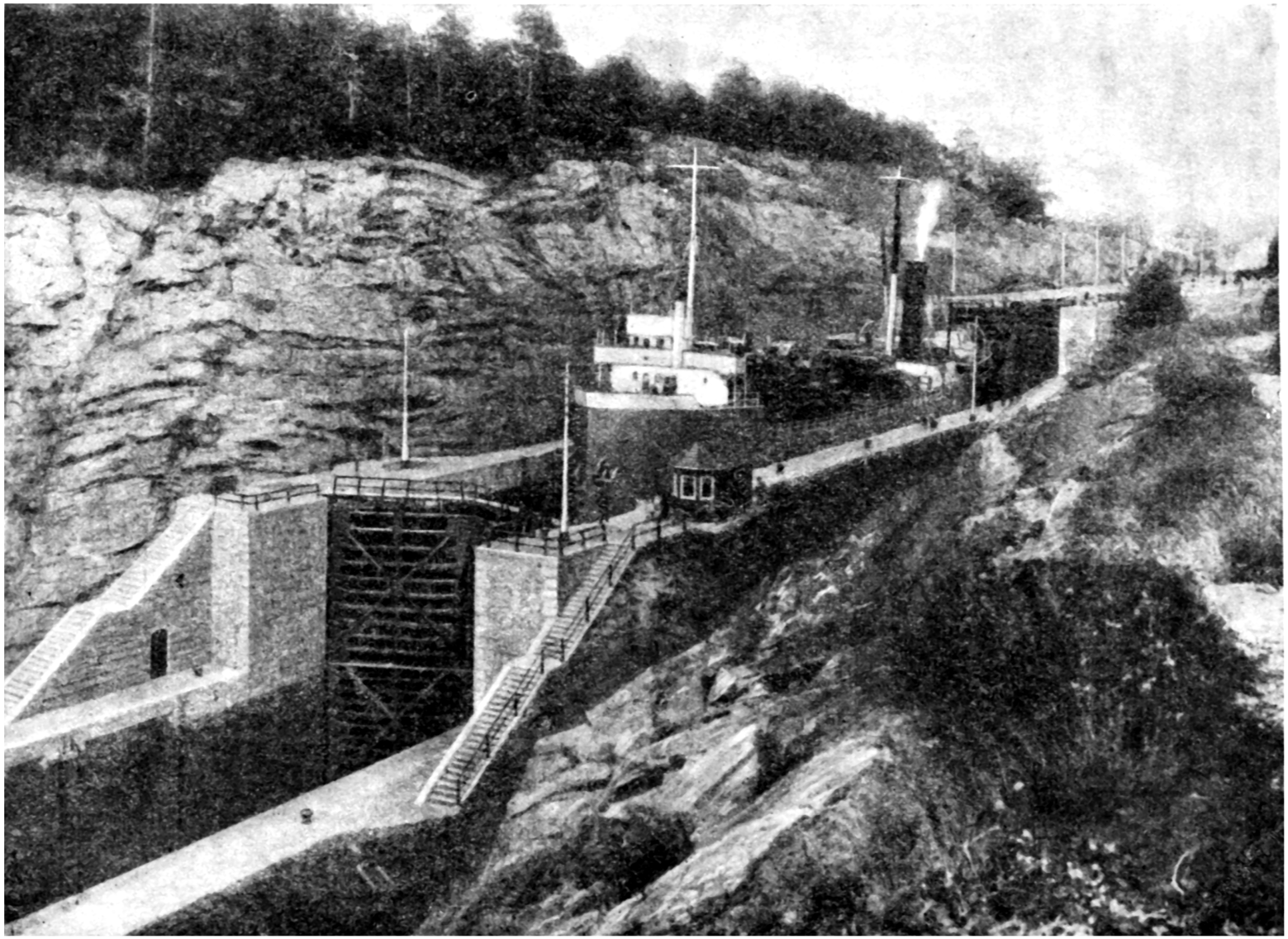
14. „Эгирь“

Ко времени прихода „Нибинга“ в Тролльгетан, там накопилось около 50 готовых паровозов и ожидались к сдаче примерно по 20 штук в ближайшие месяцы; между тем петроградский порт был объявлен шведскими властями неблагополучным по разным эпидемиям, и все провенансы из этого порта должны были выдерживать 8-дневный карантин. Этим продолжительность полного рейса удлинялась до 24 дней, и „Нибинг“ один не был бы в состоянии выполнить признанной ударной перевозки 97 шведских паровозов в срок до конца сентября 1922 г. Ввиду этого был заключен особый договор с фирмой, по которому срочная перевозка упомянутых паровозов поручалась этой фирме с обязательством перевозить паровозы на „Нибинге“ из Тролльгетана в Ландскрону, здесь без задержек выгружать их на берег, хранить на берегу и с берега грузить на принадлежащие фирме моторные суда „Один“ и „Эгирь“, на коих и доставлять в Петроград. Тендера разрешалось или доставлять в Ландскрону на „Нибинге“ же, или же, если это окажется невозможным, то по железной дороге. Для этой перевозки „Нибинг“ предоставлялся в распоряжение фирмы. Все расходы и сборы ложились на фирму.

15. Наблюдение за работой „Нибинга“ в канале

Первая же погрузка паровозов в Тролльгетане дала возможность автору проверить все теоретические элементы, т. е. число тонн на 1 дюйм осадки, момент, изменяющий дифферент на 1 фут, метацентрическую высоту и положение центра тяжести корабля.

Для этого с фок-мачты был опущен весок длиною около 20 футов, и по его отклонениям замечался крен, происходящий от поперечного перемещения паровоза, когда последний перекатывался на платформе из положения, в котором он опускался краном, до положения, при котором он передавался на соответствующий путь. Это наблюдение давало метацентрическую высоту. Наблюдение изменения углубления штевней при погрузке каждого паровоза и при продольном их перемещении,



Фиг. 25. „Нибинг“ в шлюзе.

давало число тонн на 1 дюйм осадки и момент, изменяющий дифферент на 1 дюйм или фут. Полученные результаты оказались в полном согласии с теоретическими.

Первые рейсы „Нибинг“ делал без тендеров, так как они еще ранее были доставлены в Ландскрону по железной дороге.

Первый рейс с паровозами был сделан 30 июля 1922 г., причем их было погружено 11. Пароход шел с двумя буксирами, без всяких затруднений втягивался в шлюзы и при проходе по реке нигде не притыкался ни к берегу, ни к отмели.

В первый рейс „Нибинг“ имел свыше 140 т угля, запасенного им еще в Кардиффе. После погрузки 11 паровозов и ящиков с принадлежностями, балласт для получения требуемого углубления был распределен так:

Форпик	94 т
Систерна № 1	286 „
Систерны № 2, 3, 4	порожние
Ахтерпик	12 т (питьевая вода)

Углубление было:

форштевень	11′ 10″
ахтерштевень	13′ 6″
Метацентрическая высота	около 50″

Простой подсчет показывал, что по израсходовании около 100 т угля можно было погрузить все 11 тендеров с ящиками и углем в них, о чем автором и было сделано соответствующее представление с тем, чтобы тендера направлять из Эскильстуны в Тролльгетан.

Первый рейс с тендерами на „Нибинге“ автор сделал сам, чтобы указать все надлежащие меры, так как и фирма и представитель Дерутра, ведавшей страхованием грузов, отказались нести какую-либо ответственность за „Нибинг“ при ходе его по каналу с тендерами.

Когда пароход был таким образом нагружен 11 паровозами и 11 тендерами и имел заполненной балластную систерну № 1, а форпик более чем наполовину пустым, то углубление штевней оказалось:

Форштевень	13′ 8″
Ахтерштевень	14′ 0″

Погрузка была окончена около 7 часов вечера, и на утро 10 сентября были заказаны буксиры и лоцман для проводки по реке и шлюзам, но автору было сообщено, что администрация канала не разрешает пароходу итти, ибо углубление ахтерштевня — 14 футов — составляет 4.267 м, а по правилам допускается 4.20 м. На оз. Окерше был мертвый штиль, марка 14 футов выделялась ясно, и уровень воды шел ровнехонько по черте и нижней кромке цифр, углубление 14 футов ахтерштевнем было

неоспоримо, а значит и его избыток в 67 мм против правил. Никакие убеждения, что при проходе рекою мы сами мерили глубину близ Лилле Эдетт и было не меньше 16 футов, что даже если бы и было воды 4.20 м, т. е. $13'9\frac{1''}{2}$, то корабль коснулся бы грунта кормовым дейдвудом, т. е. острою частью и прошел бы совершенно свободно, ибо грунт — твердый ил, не оказывали на стойкого шведа ни малейшего впечатления. Пришлось заполнить питьевой водой только расходную систерну, остальную питьевую воду из ахтерпика выкачать, заполнить форпик вполне и откачивать воду из систерны № 1, пока корабль сел на ровный киль с углублением $13'9''$, т. е. 4.191 м к полному удовлетворению администрации канала. При систерне № 1, заполненной лишь отчасти, и остальных систернах порожних метацентрическая высота оказывается около $6—8''$, корабль представляется мало остойчивым в прямом положении, но рассмотрение его диаграммы показывает, что он вполне безопасен для плавания при этой нагрузке; тем не менее, по проходе последнего шлюза и мелкого места у Лилле Эдетт, было приказано заполнять балластные систерны водою и таким образом обеспечивать даже и начальную остойчивость в полной мере.

Приложение 1-е

Силы, действующие на паровоз при качке корабля

§ 1. Корабль, идущий на взволнованном море, совершает следующие колебательные движения:

а) орбитальное движение центра тяжести.

б) вращательное движение около центра тяжести.

§ 2. Орбитальное движение совершается в плоскости бега волны, и если эту плоскость принять за координатную плоскость $(\xi\zeta)$, направив ось ξ по бегу волны, ось ζ вертикально вниз и взяв начало координат в месте Ц. Т. корабля при покое и равновесии на тихой воде, то уравнения движения Ц. Т. будут вида

$$\xi = a \sin\frac{2\pi t}{\tau}; \quad \zeta = b \cos\frac{2\pi t}{\tau}$$

причем a и b — некоторые постоянные, зависящие от размеров волны и корабля, от его курса и хода. При ходе лагом к волне (боком) можно считать $a = b = \frac{h}{2}$, где h есть высота волны, τ — ее период.

При ходе в разрез волны a и b меньше $\frac{h}{2}$, так, например, когда длина корабля равна длине волны, то a очень мало, b приблизительно равно $\frac{h}{4}$.

§ 3. Вращательное движение корабля разлагается на три независимых вращения около главных осей инерции корабля, практически совпадающих с его продольною, поперечною и вертикальною осью, проведенными через его Ц. Т.

Вращение около продольной оси называется *боковою* качкою корабля. вращение около поперечной оси — *килевою* качкою и вращение около вертикальной оси — *рысканием*.

Уравнения этих движений в конечном виде имеют такой вид.

Боковая качка:

$$\Theta = A\sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \alpha\right) + B\sin\left(\frac{2\pi t}{\tau} + \beta\right) \tag{1}$$

Килевая качка:

$$\psi = C\sin\left(\frac{2\pi t}{\tau} + \gamma\right) \tag{2}$$

Рыскание:

$$\varphi = D\sin\left(\frac{2\pi t}{\tau} + \delta\right) \tag{3}$$

где A, B, C, D — некоторые постоянные, зависящие от размеров корабля и волны; T — период свободных боковых розмахов корабля; α, β, γ, δ — некоторые постоянные, определяющие запаздывание фаз.

Наибольшие значения, которых достигают величины A, B, C, D, т. е. амплитуды розмахов качки на сторону, составляют для больших судов: A — до 20°; B при этом — до 10°, C — до 8°, когда длина волны раза в 2—3 больше длины корабля. D примерно — до 4°, когда корабль идет косвенным к волне курсом и длина волны не меньше длины корабля.

Для Балтийского моря длина волны даже после двухдневного наибольшей силы SW ветра достигает примерно 300 футов при высоте до 15 футов и периоде τ около 7 сек., поэтому в Балтийском море для таких судов, как „Маскинонж“ и „Мендипренж“, трудно ожидать боковую качку с розмахом свыше 15° на сторону ($A=10°$; $B=5°$; $T=12$ сек.; $\tau=7$ сек.) и килевую свыше 4° ($C=4°$). Для „Один“, вследствие сравнительно малого периода его свободных розмахов, боковая качка может выйти из этих пределов и достигнуть до 25—30° на сторону, килевая же не превзойдет 5° ($A=20°$, $B=10°$, $C=5°$, $T=9$ сек.). Для „Нибинга“ могут быть случаи, когда боковая качка достигнет 20° ($A=15°$; $B=6°$; $T=10$ сек.; $\tau=7$ сек.) и килевая — до 6°.

Было бы слишком долго и сложно излагать основания этих расчетов. Надо сказать, что они составляют одно из обязательных упражнений слушателей Академии, и за время с 1896 г., когда я подробно развил общую теорию качки корабля на волнении и указал способы ее предвычисления, у меня в этом деле развился такой глазомер, что я вперед указываю результат расчета с ошибкою не более 10—15%.

§ 4. Всякое тело, находящееся на корабле, участвует в его движениях и, получая при этом ускорения, подвергается так называемым *силам инерции*, вызывающим или движения этого тела по отношению к кораблю, или добавочные напряжения в тех связях, коими оно с кораблем скреплено.

В тех случаях, когда тело, находящееся на корабле, совершает по отношению к кораблю движения, скорость коих мала, то можно пренебрегать так называемою *сложною центробежною силою* (Кориолиса), в некоторых же случаях (откат и накат орудия) эту силу надо принимать в расчет. В нашем случае сила Кориолиса может быть отброшена по ее малости и, значит, для получения не только условий равновесия (относительного) тела на корабле, но и его движения можно ограничиться только добавлением сил инерции *переносного* движения.

§ 5. Для практических расчетов можно внести и еще одно упрощение: углы розмахов считать малыми, т. е. заменять синус угла числовою мерою самого угла, косинус же угла единицею.

По отношению к углу ψ величина коего не более $6^\circ = \frac{1}{10}$ будет:

$$\sin\psi = \frac{1}{10} - \frac{1}{6}\left(\frac{1}{10}\right)^3 + \ldots \text{ вместо этого берем } \sin\psi = \psi = \frac{1}{10}$$

$$\cos\psi = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{10}\right)^2 + \ldots \text{ вместо этого берем } \cos\psi = 1$$

Ясно, что погрешность ничтожна.

По отношению к углу Θ, величина коего может достигать до $20^\circ = \frac{1}{3}$ будет

$$\sin\Theta = \frac{1}{3} - \frac{1}{6}\left(\frac{1}{3}\right)^3 + \ldots \text{ вместо этого берем } \sin\Theta = \Theta = \frac{1}{3}$$

$$\cos\Theta = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}\right)^2 + \ldots \text{ вместо этого берем } \cos\Theta = 1$$

как видно, в значении синуса погрешность может достигнуть $\frac{1}{162}$, при величине самого синуса равной $\frac{1}{3}$, т. е. 2%, в значении же косинуса — $\frac{1}{18}$ при его величине около 1, т. е. около 6%.

Для практических целей такая точность более чем достаточна.

Наконец, третье упрощение, которое допустимо, — это пренебречь силами инерции, происходящими от рыскания, по их малости сравнительно с прочими. Это равносильно тому, что считать все время $\varphi = 0$.

§ 6. Возьмем в корабле оси ox, oy, oz, неизменно с ним связанные и начало коих в его центре тяжести, ox — направлена в нос, oy — влево,

oz — вниз, тогда с указанным выше приближением косинусы углов между осями будут представляться формулами

	x	y	z
ξ	1	0	ψ
η	0	1	$-\Theta$
ζ	$-\psi$	Θ	1

(I)

на выводе которых останавливаться не будем.

Следовательно, абсолютные координаты той точки корабля, коей относительные координаты x, y, z, суть

$$\left.\begin{aligned} \xi &= \xi_0 + x + z\psi \\ \eta &= \eta_0 - z\Theta + y \\ \zeta &= \zeta_0 - x\psi + z + \Theta y \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Проекции ускорения переносного движения на оси ξ, η, ζ

$$\left.\begin{aligned} \xi'' &= \xi_0'' + z\psi'' \\ \eta'' &= \eta_0'' - z\Theta'' \\ \zeta'' &= \zeta_0'' - x\psi'' + y\Theta'' \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

На основании табл. (I) значений косинусов углов между осями проекции ускорения рассматриваемой точки корабля на оси x, y, z будут

$$\left.\begin{aligned} w_x &= \xi'' - \psi\zeta'' \\ w_y &= \eta'' + \Theta\zeta'' \\ w_z &= \zeta'' + \psi\xi'' - \Theta\eta'' \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

подставляя вместо ξ'', η'', ζ'' их величины (5) и отбрасывая все члены, содержащие множители такие, как $\psi\psi''$, $\psi\Theta''$, $\Theta\psi''$, $\Theta\Theta''$, $\psi\xi_0''$, $\Theta\zeta_0''$ и т. п., ибо эти члены не превышают в нашем случае $\frac{1}{30}\,g$, где g — ускорение силы тяжести, получим

$$\left.\begin{aligned} w_x &= \xi_0'' + z\psi'' \\ w_y &= \eta'' - z\Theta'' \\ w_z &= \zeta_0'' + y\Theta'' - x\psi'' \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

§ 7. Если в точке (xyz) находится масса m, которая по отношению к кораблю неподвижна (следовательно с кораблем связана), то, значит, действие этих связей равносильно сообщению массе ускорения, коего проекции — w_x, — w_y, — w_z; иными словами массу m можно рассматривать, как свободную, приложив к ней силы, коих проекции — mw_x, — mw_y, — mw_z, т. е., так называемые, *силы инерции переносного движения.*

Отсюда ясно, что если на корабле находится твердое тело, участвующее в движении корабля, и мы желаем найти натяжения связей, коими оно с кораблем скреплено, то надо к силе тяжести присовокупить вышеприведенные силы инерции переносного движения.

Расчет упростится, если исчислить главный вектор этих добавочных сил и их главный момент по отношению к центру тяжести рассматриваемого тела.

Для этого вообразим, что через Ц. Т. тела проведены оси координат gx_1, gy_1, gz_1, соответственно параллельные осям корабля ox, oy, oz и пусть координаты Ц. Т. тела относительно осей корабля суть x_0, y_0, z_0 и масса тела M, так что $\Sigma m = M$ и $\Sigma mx = Mx_0$; $\Sigma my = My_0$; $\Sigma mz = Mz_0$ вместе с тем

$$x = x_0 + x_1;\quad y = y_0 + y_1;\quad z = z_0 + z_1$$

тогда имеем

$$\left.\begin{aligned} X &= -\Sigma m w_x = M\xi_0'' - Mz_0\psi'' = -\frac{P}{g}(\xi_0'' + z_0\psi'') \\ Y &= -\Sigma m w_y = Mz_0\Theta'' = \frac{P}{g}z_0\Theta \\ Z &= -\Sigma m w_z = -M\zeta_0'' - My_0\Theta'' + Mx\psi'' = -\frac{P}{g}(\zeta_0'' + y_0\Theta'' - x_0\psi'') \end{aligned}\right\} \quad (II)$$

Проекции же главного момента будут:

$$H = -\Sigma[w_y(x - x_0) - w_x(y - y_0)]m = \Theta''\Sigma mx_1z_1 - \psi''\Sigma mz_1y_1$$
$$K = -\Sigma[w_x(z - z_0) - w_z(x - x_0)]m = -\psi''\Sigma m(x_1^2 + z_1^2) + \Theta''\Sigma mx_1y_1$$
$$L = -\Sigma[w_z(y - y_0) - w_y(z - z_0)]m = -\Theta''\Sigma m(y_1^2 + z_1^2) + \psi''\Sigma mx_1y_1$$

Суммы

$$\Sigma m(y_1^2 + z_1^2) = J_x;\quad \Sigma m(x_1^2 + z_1^2) = J_y$$

суть *моменты инерции* тела относительно его осей gx_1 и gy_1.

Суммы же

$$\Sigma mx_1y_1 = J_{xy};\quad \Sigma mx_1z_1 = J_{xz};\quad \Sigma m_1y_1z_1 = J_{yz}$$

суть так называемые *центробежные моменты* этого тела. Таким образом, имеем

$$\left.\begin{aligned} H &= \Theta''J_{xz} - \psi''J_{yz} \\ K &= -\psi''J_y + \Theta''J_{xy} \\ L &= -\Theta''J_x + \psi''J_{xy} \end{aligned}\right\} \quad (III)$$

§ 8. В нашем случае — паровозов, поставленных или параллельно или перпендикулярно диаметральной плоскости, — одна из координатных осей Gx_1 или Gy_1, именно та, которая перпендикулярна к плоскости симметрии паровоза, будет в точности, а другие две весьма близки к главным осям инерции его, так что можно считать

$$J_{yz} = J_{xy} = J_{xz} = 0$$

Что касается моментов инерции I_x и I_y паровоза, то при положении паровоза вдоль корабля будет

$$J_x = \frac{P}{g} \cdot r^2 \quad \text{и} \quad J_y = \frac{P}{g} \cdot R^2$$

причем r будет около 4 футов, R — около 12 футов. При поперечном положении будет

$$I_x = \frac{P}{g} \cdot R^2 \quad \text{и} \quad I_y = \frac{P}{g} \cdot r^2$$

Наибольшее значение ψ'' около $\frac{1}{12}$ и наибольшее значение Θ'' около $\frac{1}{6}$; таким образом при продольном положении будет

$$H = 0$$

$$K < \frac{P}{32} \cdot 12 \cdot 12 \cdot \frac{1}{12}, \text{ т. е. } K < P \cdot \left(\frac{3}{8} \text{ фута}\right) — \text{попер. ось}$$

$$L < \frac{P}{32} \cdot 4 \cdot 4 \cdot \frac{1}{6}, \text{ т. е. } L < P \cdot \left(\frac{1}{12} \text{ фута}\right) — \text{прод. ось}$$

При поперечном положении будет

$$H = 0$$

$$K < \frac{P}{32} \cdot 4 \cdot 4 \cdot \frac{1}{12}, \text{ т. е. } K < P\left(\frac{1}{24} \text{ фута}\right) — \text{прод. ось}$$

$$L < \frac{P}{32} \cdot 12 \cdot 12 \cdot \frac{1}{6}, \text{ т. е. } L < P\left(\frac{3}{4} \text{ фута}\right) — \text{попер. ось}$$

Так как плечо тяги стропов, коими паровозы крепятся, относительно продольной оси паровоза не меньше 3 футов, а относительно поперечной — около 18 футов, то наибольшее натяжение стропов от этих моментов не более $\frac{1}{24} P$, т. е. 3т, поэтому можно эти моменты K и L отбросить и считать только, что кроме веса на паровоз действуют силы X, Y, Z, величины коих даны формулами (II).

О величине этих сил можно судить по таким данным. Наибольшие величины, которых достигают ξ_0'' и ζ_0'' суть 4 фута/сек.^{2} и 7 футов/сек.^{2}; z_0 — около 15′, x_0 — до 150′, y_0 — до 20′; значит будет

$$X \leqslant \frac{P}{32}\left(4 + 15 \cdot \frac{1}{12}\right), \quad \text{т. е. } X < \frac{1}{6} P$$

$$Y \leqslant \frac{P}{32} \cdot 15 \cdot \frac{1}{6}, \quad \text{т. е. } Y < \frac{1}{12} P$$

$$Z \leqslant \frac{P}{32}\left(7 + \frac{1}{6} 20 + 150 \cdot \frac{1}{12}\right), \text{ т. е. } Z \leqslant \frac{2}{3} P$$

при этом вычислении все величины ξ_0'', ζ_0'', ψ'', Θ'' взяты для получения верхнего предела с одним знаком, ибо вследствие разности фаз может быть и такое сочетание их значений.

§ 9. Значительная величина силы Z показывает, насколько необходимо заклинивание рессор, ибо „кажущийся“, т. е. действующий на рессоры вес мог бы изменяться в пределах от

$$\frac{1}{3} P \text{ до } 1.67\, P$$

где P — истинный вес паровоза.

§ 10. Имея выражения (II) составляющих „добавочной“ силы, действующей на паровоз при качке корабля, нетрудно рассчитать по правилам статики крепления паровоза к кораблю и их напряжения, в подробности чего входить не будем.

Приложение 2-е

Расчет подкреплений палубы в районе люков

Напряжения в карленсе и полубимсах в районе большого погрузочного люка могут быть с достаточным приближением рассчитаны, приняв, что карленс лежит на непрерывной упругой опоре на всем своем протяжении и заделан по концам.

Относящиеся к такому случаю нагрузки и закрепления формулы, вероятно, можно найти готовыми, но их нетрудно и вывести следующим образом.

Пусть AB есть балка, заделанная в концах A и B; обозначим через E модуль упругости материала, J — момент инерции площади поперечного сечения балки, p — нагрузку на погонный метр, z — прогиб в точке, абсцисса коей x (начало координат O посредине балки), kz — реакция упругой опоры, отнесенная на погонный метр длины балки, l — полудлина балки.

При этих обозначениях имеем дифференциальное уравнение

$$EJz^{\text{IV}} = -kz + p \tag{1}$$

и условия закрепления:

$$\left.\begin{array}{l} \text{при } x = l \text{ должно быть: } (z)_l = 0 \text{ и } (z')_l = 0 \\ \text{при } x = -l \text{ должно быть: } (z)_{-l} = 0 \text{ и } (z')_{-l} = 0 \end{array}\right\} \tag{2}$$

Положив для краткости письма

$$\frac{p}{EJ} = b \quad \text{и} \quad \frac{k}{EJ} = n^4$$

придаем дифференциальному уравнению (1) вид (1′)

$$z^{\text{IV}} + n^4 z = b \tag{1′}$$

Общий интеграл этого уравнения

$$z = \alpha + A \operatorname{ch} \beta x \cdot \cos \beta x + B \operatorname{sh} \beta x \cdot \cos \beta x + C \operatorname{ch} \beta x \cdot \sin \beta x + D \operatorname{sh} \beta x \cdot \sin \beta x \tag{3}$$

причем

$$\alpha = \frac{b}{n^4} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{\sqrt{2}}{2} n$$

$\operatorname{ch} \beta x$ и $\operatorname{sh} \beta x$ обозначают гиперболические косинус и синус аргумента βx; A, B, C, D — произвольные постоянные, коих значения определяются граничными условиями (2).

Определение этих значений упрощается, если принять, что балка симметрична и, следовательно,

$$B = C = 0$$

Тогда будет:

$$z = \alpha + A \operatorname{ch} \beta x \cos \beta x + D \operatorname{sh} \beta x \sin \beta x \tag{4}$$

$$\frac{1}{\beta} z' = A (\operatorname{sh} \beta x \cos \beta x - \operatorname{ch} \beta x \sin \beta x) + D (\operatorname{ch} \beta x \sin \beta x + \operatorname{sh} \beta x \cos \beta x) \tag{5}$$

и, значит, условия (2) будут

$$-\alpha = A \operatorname{ch} \beta l \cos \beta l + D \operatorname{sh} \beta l \sin \beta l$$
$$0 = A (\operatorname{sh} \beta l \cos \beta l - \operatorname{ch} \beta l) + D (\operatorname{ch} \beta l \sin \beta l + \operatorname{sh} \beta l \cos \beta l)$$

и из них после простых преобразований получается

$$\left.\begin{aligned} A &= -2\alpha \frac{\operatorname{ch} \beta l \sin \beta l + \operatorname{sh} \beta l \cos \beta l}{\sin 2\beta l + \operatorname{sh} 2\beta l} \\ D &= \quad 2\alpha \frac{\operatorname{sh} \beta l \cos \beta l - \operatorname{ch} \beta l \sin \beta l}{\sin 2\beta l + \operatorname{sh} 2\beta l} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Формулы (4) и (6) содержат полное решение нашего вопроса.

Из этих формул следует:

1) наибольший прогиб (при $x = 0$)

$$z_0 = \alpha + A \tag{7}$$

Соответствующая наибольшая реакция упругой опоры

$$Q = k z_0 \tag{8}$$

2) Изгибающий момент

$$\mathfrak{M} = EJ \cdot z'' \tag{9}$$

причем

$$z'' = -2A\beta^2 \operatorname{sh} \beta x \sin \beta x + 2D\beta^2 \operatorname{ch} \beta x \cos \beta x \tag{9'}$$

следовательно,

изгибающий момент посредине $(x = 0)$

$$\mathfrak{M}_0 = 2\beta^2 D \cdot EJ \tag{10}$$

момент в месте закрепления ($x = l$)

$$\mathfrak{M}_1 = 2\beta^2 (D \operatorname{ch} \beta l \cos \beta l - A \operatorname{sh} \beta l \sin \beta l) = 2\beta^2 \alpha E J \cdot \frac{\operatorname{sh} 2\beta l - \sin 2\beta l}{\operatorname{sh} 2\beta l + \sin 2\beta l} \quad (10')$$

3) Величина k в выражении реакции kz, которой мы заменили сосредоточенные реакции полубимсов, определяется из следующих соображений; пусть l_1 — длина полубимса, J_1 — момент инерции площади его сечения, c — промежуток между полубимсами, p_1 — нагрузка, приходящаяся на один полубимс на конце, заменяющая собою непрерывно распределенную реакцию нами принятой упругой опоры, f — стрелка прогиба, тогда имеем

$$kf \cdot c = p_1 \quad (11)$$

с другой стороны

$$f = \frac{1}{12} p_1 \frac{l_1^3}{E J_1} \quad (12)$$

отсюда следует

$$k = 12 \frac{E J_1}{l_1^3 c} \quad (13)$$

$$n^4 = 12 \frac{J_1}{J} \cdot \frac{1}{l_1^3 c} \quad (14)$$

тогда

$$\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot n = \sqrt[4]{3} \sqrt[4]{\frac{J_1}{J} \cdot \frac{1}{l_1^3 c}} \quad (15)$$

и

$$\beta l = \sqrt[4]{3} \sqrt[4]{\frac{J_1}{J} \cdot \frac{l^4}{l_1^3 c}} \quad (16)$$

Теперь все формулы подготовлены для непосредственного вычисления, которое уже не представляет никаких затруднений, и показывает, что принятые размеры карленса и комингсов люка вполне обеспечивают крепость палубы в районе этого люка.

Приложение 3-е

Вычисление водоизмещения и остойчивости парохода „Нибинг“

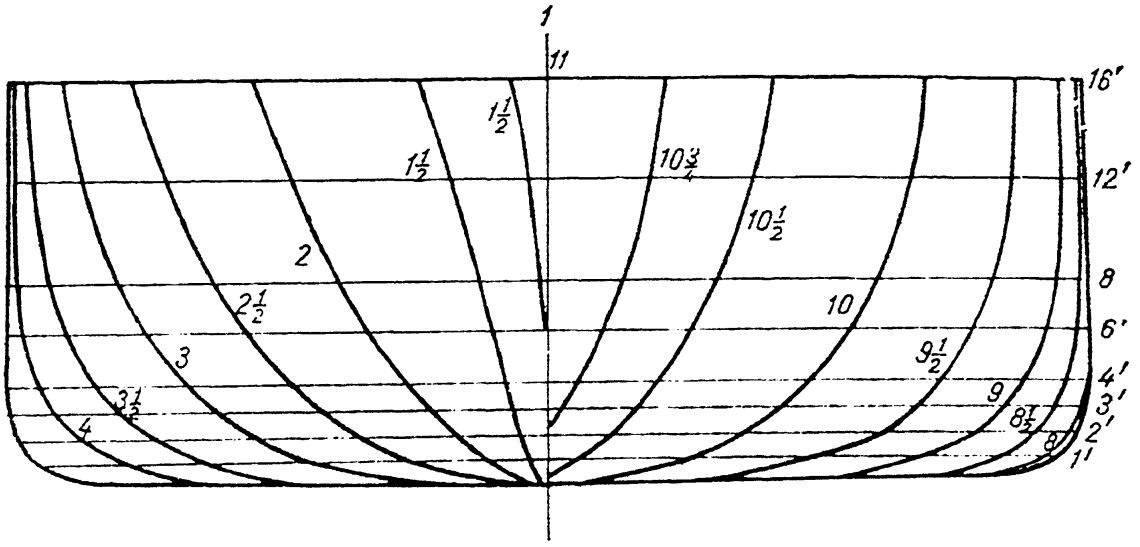
Вычисление водоизмещения произведено при углублении 12 футов, от которого затем легко перейти как к углублению в полном грузу, так и при загрузке только паровозами без тендеров.

Вычисление водоизмещения, положения центра величины и метацентра при прямом положении корабля произведено по обычному способу, пользуясь теоретическим чертежом корабля (подводная часть корпуса), умень-

шенный снимок коего показан на фиг. 26, применяя правило трапеций с дополнительными ватерлиниями и шпангоутами.

Ординаты снимались с чертежа прямо в миллиметрах, и затем окончательные результаты переводились в английские меры соответственно масштабу чертежа, именно 1 фут $=\frac{1}{4}$ дюйма $=6.35$ мм.

Вычисление остойчивости произведено при углублении 14′, соответствующем полной нагрузке 11 паровозами и 11 тендерами.



Фиг. 26. Подводная часть корпуса. $L=248'$, $B=42'$.

Это вычисление произведено по тому приему и тем формулам, которые развиты в читаемом автором курсе теории корабля в Морской академии.

Сущность этого приема ссстоит в том, что через ось грузовой ватерлинии в прямом положении (фиг. 27) проводятся наклонные ватерлинии через 10°; для каждой из них снимаются выходящие (a) и входящие (b) ординаты и вычисляются следующие элементы

$$\text{Площадь } S=\int_0^L (a+b)\,dx$$

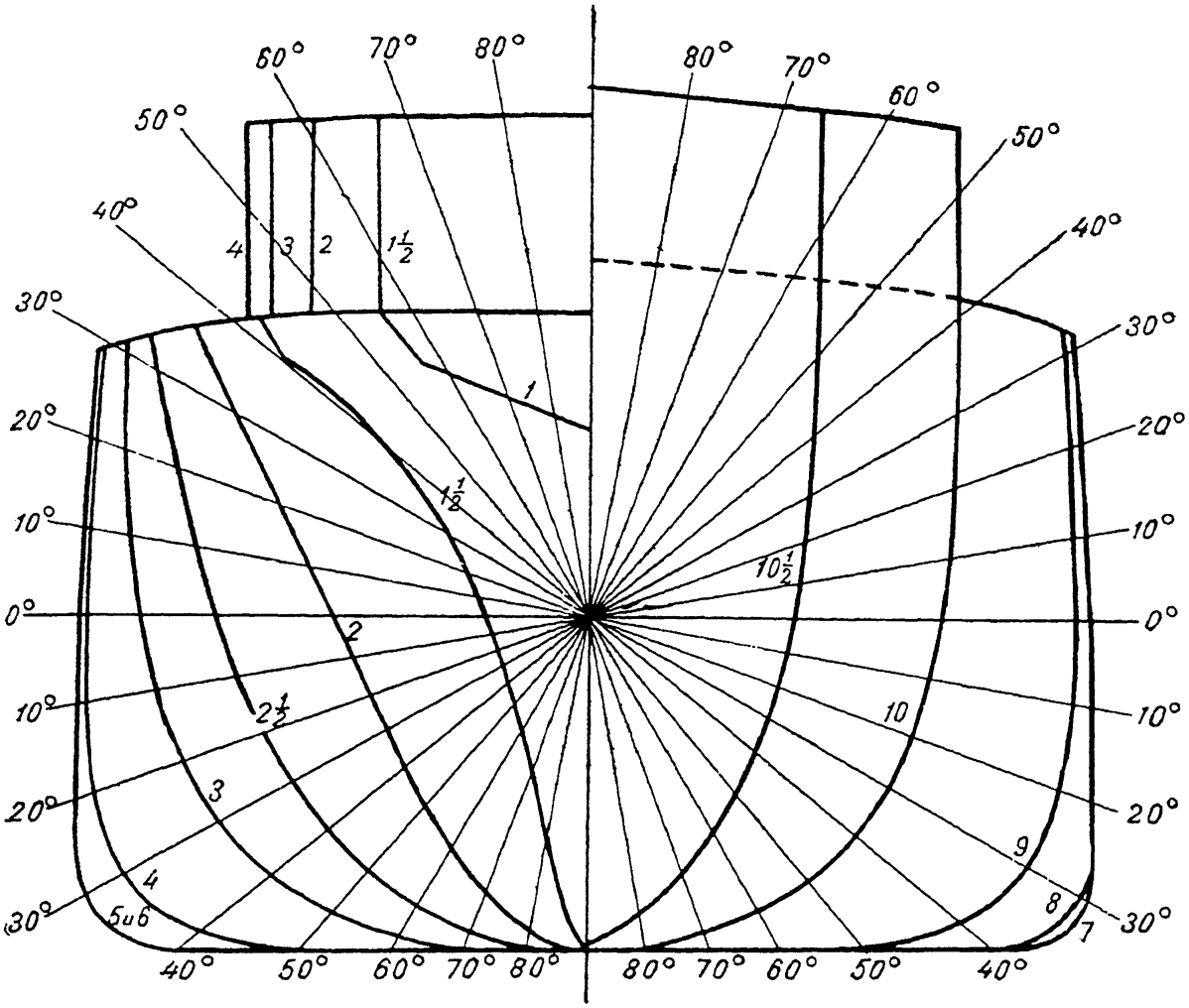
$$\text{Ордината Ц. Т. площади: } \varepsilon=\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{S}\cdot\int_0^L (b^2-a^2)\,dx$$

Момент инерции

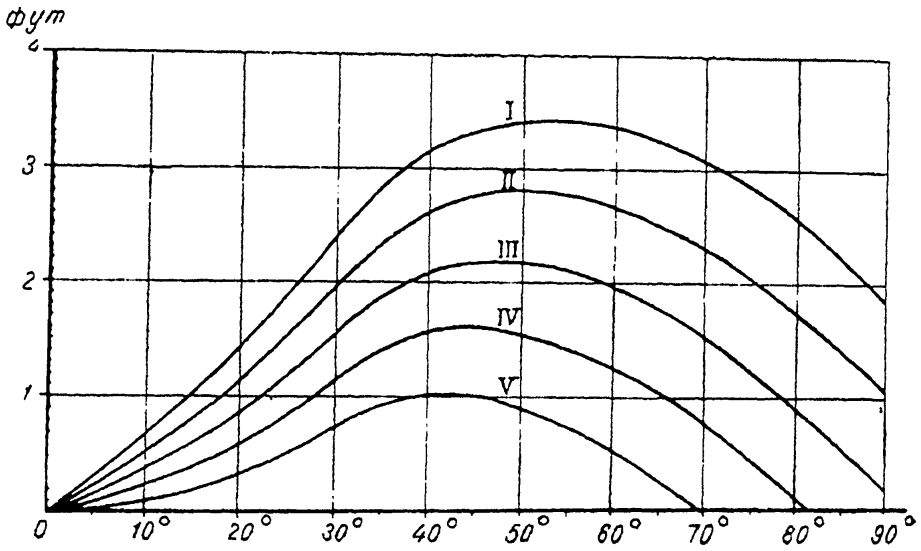
$$I=\frac{1}{3}\int_0^L (a^3+b^3)\,dx-S\cdot\varepsilon^2$$

Метацентрический радиус

$$\rho=\frac{I}{V_0}$$



Фиг. 27. Корпус с надводной частью.

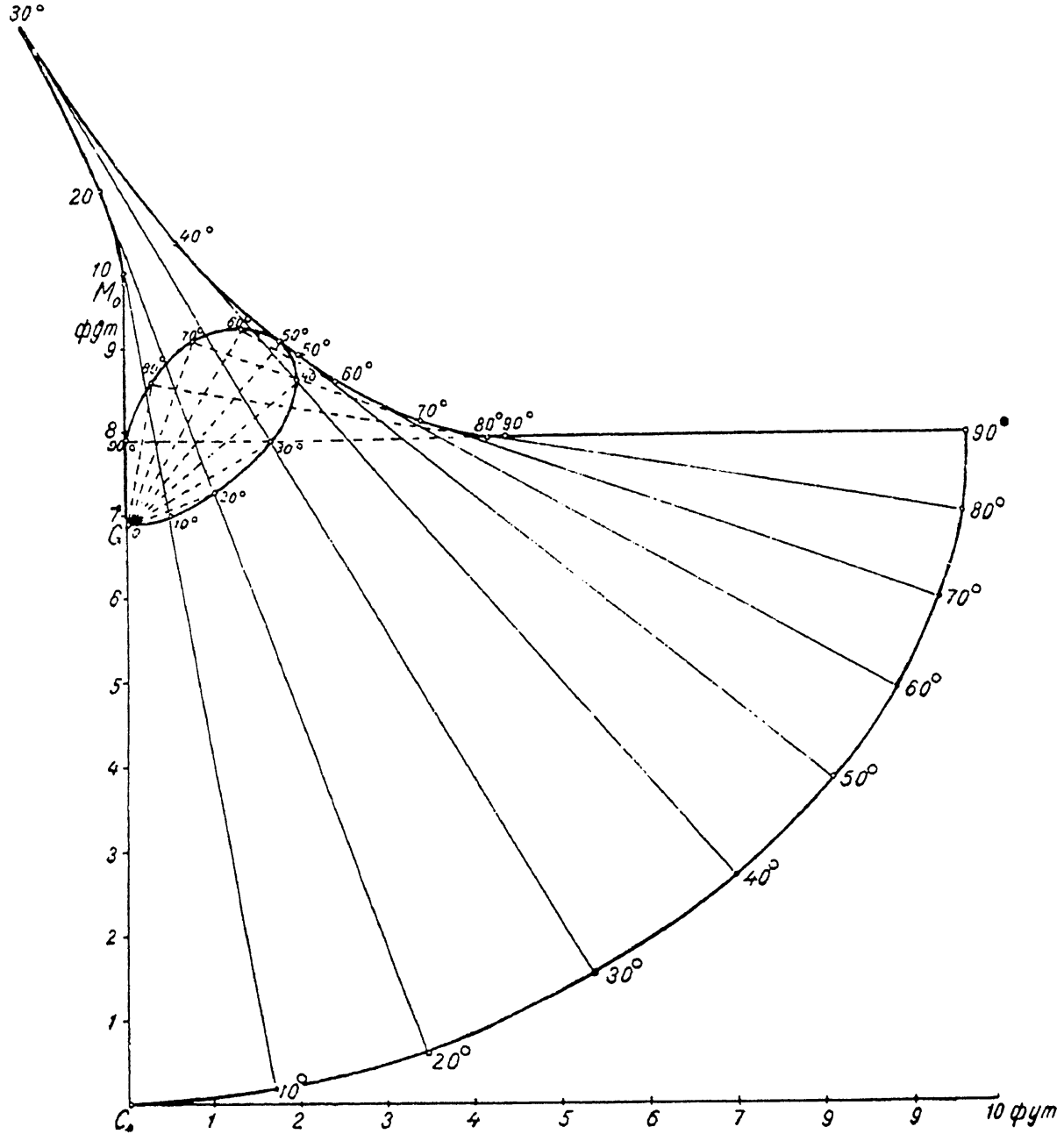


Фиг. 28. Диаграммы остойчивости.
Углубление 14′0″, $D = 2940$ т. Начальная метацентрическая высота M_0G: $I = 45''$; $II = 35''$, $III = 25''$, $IV = 15''$, $V = 5''$.

Проведя через точку C_0 — центр величины в прямом положении — оси: $C_0 y$ — вправо и $C_0 z$ — вверх, имеем, предполагая крен на правую сторону, следующие формулы для вычисления координат центра величины C при наклонном на угол θ положении корабля:

$$y = \int_0^{\theta} \rho \cos \Theta \cdot d\Theta$$

$$z = \int_0^{\theta} \rho \sin \Theta \cdot d\Theta$$



Фиг. 29. Метацентрическая эволюта.
$H = 14'$; $D = 2940$ т; $M_0 C_0 = 9.8'$; $M_0 G = 35''$.

Обозначая через a возвышение центра тяжести над центром величины в прямом положении, имеем для плеч остойчивости:
статической

$$r = y\cos\theta + z\sin\theta - a\sin\theta$$

и динамической

$$d = \int_0^\theta r\,d\Theta = y\sin\theta - z\cos\theta - a(1-\cos\theta)$$

Координаты метацентра

$$Y = y - \rho\sin\theta$$
$$Z = z + \rho\cos\theta$$

Результаты вычисления представлены графически путем построения диаграмм статической остойчивости (фиг. 28), а также и метацентрической эволюты (фиг. 29).

КАРТИНА ГИБЕЛИ б. ЛИНЕЙНОГО КОРАБЛЯ „ИМП. МАРИЯ“[1]

Ниже приводимое „Заключение Следственной комиссии по делу о гибели б. линейного корабля «Императрица Мария»“ было написано мною и по докладе принято Комиссией единогласно для дальнейшего направления.

* * *

Комиссия, сопоставив показания командира, офицеров и нижних чинов об обстоятельствах гибели линейного корабля „Имп. Мария“, пришла к следующим заключениям.

I. Последовательность событий, сопровождавших эту гибель, устанавливается показаниями как экипажа самого корабля, так и записью в вахтенных журналах других судов.

7 октября (1916 г.), приблизительно через четверть часа после утренней побудки, нижние чины, находившиеся поблизости с первой носовой башней, услышали особое шипение и заметили вырывавшиеся из люков и вентиляторов около башни, а также из амбразур башни, дым, а местами пламя.

Одни из них побежали докладывать вахтенному начальнику о начавшемся под башнею пожаре, другие, по распоряжению фельдфебеля, раскатали пожарные шланги и, открыв пожарные краны, стали лить воду в подбашенное отделение. Пробили пожарную тревогу. Но через $1\frac{1}{2}$ или 2 минуты после начала пожара внезапно произошел сильный взрыв в районе носовых крюйт-камер, содержавших 12-дюймовые заряды, причем столб пламени и дыма взметнуло на высоту до 150 сажен. Этим взрывом вырвало участок палубы позади первой башни, снесло переднюю трубу, носовую рубку и мачту. Множество нижних чинов, находившихся в носовой части корабля, было убито, обожжено и сброшено за борт силою газов. Паровая магистраль вспомогательных механизмов была перебита, электрическое освещение потухло, пожарные насосы прекратили работу.

---

[1] Впервые напечатано в сборнике статей „Эпрон“ по судоподъему, водолазному и аварийно-спасательному делу (1934).

В районе позади носовой башни образовался как бы провал, из которого било пламя и сильный дым, прекратившие сообщение с носовою частью корабля. Взрыв этот отмечен в записях вахтенных журналов других судов и произошел в 6 ч. 20 м. утра.

По записи в журнале линейного корабля „Евстафий", дальнейшее развитие пожара на линейном корабле „Имп. Мария" представляется так:

6 ч. 20 м. На л. к. „Имп. Мария" большой взрыв под носовой башней.
„ 25 м. Последовал второй взрыв, малый.
„ 27 м. Последовали два малых взрыва.
„ 30 м. Л. к. „Имп. Екатерина" на буксире портовых катеров отошла от „Марии".
„ 32 м. Три последовательных взрыва.
„ 34 м. Три последовательных взрыва.
„ 35 м. Последовал один взрыв. Спустили гребные суда и послали к „Марии".
„ 37 м. Два последовательных взрыва.
„ 40 м. Один взрыв.
„ 45 м. Два малых взрыва.
„ 47 м. Три последовательных взрыва.
„ 49 м. Один взрыв.
„ 51 м. Один взрыв.
„ 54 м. Один взрыв.
7 ч. 00 м. Один взрыв. Портовые катера начали тушить пожар.
„ 02 м. Один взрыв. „Имп. Мария" начала погружаться носом.
„ 08 м. Один взрыв. Форштевень ушел в воду.
„ 12 м. Нос „Марии" сел на дно.
„ 16 м. „Мария" начала крениться и легла на правый борт.

На линейном корабле „Имп. Екатерина" записано:

6 ч. 19 м. На л. к. „Имп. Мария" пробили пожарную тревогу.
„ 20 м. На л. к. „Имп. Мария" сильный взрыв в носовой части корабля. Команда начала бросать койки и бросаться в воду.

В дальнейшем идет запись, отмечающая приблизительно те же моменты последовательных взрывов, как и на „Евстафии".

На самом корабле „Имп. Мария" в это время были приняты следующие меры: сделано распоряжение и приведено в исполнение о затоплении погребов 2-й, 3-й и 4-й башен; приняты шланги с подошедших портовых баркасов и струи воды направлены в место главного пожара; подан буксир на портовый пароход и корабль повернут лагом к ветру, затушены небольшие пожары, возникшие в разных местах на верхней палубе от падавших горящих лент пороха, выбрасывавшихся отдельными небольшими взрывами из места главного пожара.

Около 7 часов утра пожар стал как бы стихать, корабль не имел ни заметного дифферента на нос, ни крена, и казалось, что он будет спасен, но в 7 ч. 02 м. раздался взрыв, значительно более сильный

нежели прочие; после этого взрыва корабль стал быстро садиться носом и крениться на правый борт.

Носовые пушечные порта, а затем и носовая часть верхней палубы ушли под воду, корабль, утратив остойчивость, стал медленно опрокидываться и, перевернувшись вверх килем, затонул на глубине от 10 сажен в носу до 8 сажен в корме, причем носовая его оконечность ушла в ил на 25 футов, кормовая на 3 или 4, и корабль лежит на дне с небольшим креном.

Из экипажа корабля погибли: инж.-мех. мичман Игнатьев, два кондуктора и 225 нижних чинов; кроме того, было спасено 85 ранеными и обожженными. Остальные офицеры и нижние чины были спасены портовыми катерами и шлюпками с других судов флота.

Таким образом, причиною гибели корабля служит пожар, возникший в носовой крюйт-камере 12-дюймовых зарядов, повлекший за собою взрыв пороха, находившегося в этой крюйт-камере, а затем и взрывы боевых запасов, т. е. пороха и частью снарядов в расположенных в смежности с указанной крюйт-камерой погребах 130-миллиметровых орудий.

Повидимому, взрывом одного из этих погребов был или поврежден наружный борт корабля, или им сорваны клинкеты минных аппаратов, или же произошел взрыв зарядных отделений мин, или сорваны кингстоны, служащие для затопления погребов; корабль, имея разрушенные на значительном протяжении палубы и переборки, этого повреждения уже вынести не мог и быстро затонул, опрокинувшись от утраты остойчивости.

При разрушенных на значительном протяжении палубах и переборках, после повреждения наружного борта, гибель корабля была неизбежна, и выравниванием крена и дифферента, затопляя другие отсеки, что совершается медленно, предотвратить ее было невозможно.

II. Переходя к рассмотрению возможных причин возникновения пожара в крюйт-камере, комиссия остановилась на следующих трех:

а) самовозгорание пороха,

б) небрежность в обращении с огнем или с порохом,

в) злой умысел.

Здесь притти к точному и доказательно обоснованному выводу не представляется возможным, приходится лишь оценивать вероятность этих предположений, сопоставляя выяснившиеся при следствии обстоятельства.

а) Самовозгорание пороха представляется мало вероятным, и возможность его почти отпадает по следующим соображениям:

1) Порох был свежей выделки 1914 и 1915 гг., ленточный для боевых зарядов и макаронный для практических, с содержанием дифениламина в качестве реактива, которым обнаруживается, по появляющимся на лентах пятнам, малейшее начавшееся разложение пороха. Между тем в зарядах, сдававшихся с корабля в склады и лабораторию при Сухарной

балке для замены попорченных картузов и для перевязки, на такую порчу пороха не указывается. Других исследований пороха, кроме наружного осмотра, лабораторией Сухарной балки до сих пор не производится, за отсутствием соответствующих устройств.

2) Насколько известно, изготовление пороха и затем зарядов из него ведется весьма тщательно, и приняты всякие меры для исключения возможности даже случайного использования ленты с пороками, и до сих пор случаев разложения пороха, принятого для флота, не наблюдалось.

3) Температура в погребах все время была весьма умеренная, достигнув лишь один раз на несколько часов 36° R при нагревшейся от продувания в нее пара килевой балке. Нагревание балки не могло быть свыше 60—70°; произошло оно в апреле 1916 г. и повлиять по своей непродолжительности (1 - 1$\frac{1}{2}$ часа), а также и потому, что заряды непосредственно к балке не прилегали, вредно на порох не могло.

Таким образом, обстоятельств, при которых известно, что может произойти самовозгорание пороха, не обнаружено.

Свойства нашего бездымного пороха за двадцать лет пользования им изучены столь хорошо, что представляется маловероятным, чтобы могла существовать какая-либо доселе неизвестная причина, могущая вызвать его самовозгорание при тех условиях хранения, которые имели место на линейном корабле „Имп. Мария".

Таким образом, предположение о самовозгорании пороха является маловероятным.

б) Небрежность в обращении с огнем и неосмотрительность в обращении с порохом представляются также маловероятными причинами возникновения пожара.

Крюйт-камеры вентилируются, и в них не скопляется столько паров эфира и спирта, чтобы могла образоваться гремучая смесь, способная воспламениться от пламени свечи или спички и т. п.

Даже при полном отсутствии вентиляции и полном высыхании растворителя количество воздуха в крюйт-камере значительно превосходит то, при котором могла бы образоватся гремучая смесь.

Таким образом, если в крюйт-камеру зайти с зажженной свечей или зажечь спичку, заронить огонь и оставить гореть какую-нибудь тряпку, ветошь или пучок пакли, то это еще не вызовет возгорания паров эфира и спирта, хотя бы их запах и чувствовался.

Чтобы загорелся заряд, надо, чтобы самое пламя проникло в закрытый футляр и достигло или лент, или воспламенителя, или надо, чтобы воспламенитель, состоящий из шашек черного пороха, совершенно рассыпался, в виде мякоти проник через неплотно-завернутую крышку, подвергся касанию с пламенем и, вспыхнув, передал горение заряду, находящемуся в футляре.

Как видно, необходимо сочетание целого ряда случайностей, каждая из которых сама по себе маловероятна.

Крюйт-камеры всегда освещены, ходить туда должны для измерения температуры дневальные, назначаемые из комендоров данной башни, в сопровождении унтер-офицера, т. е. люди обученные и знающие правила и свои обязанности, поэтому мало вероятно, чтобы они допустили себя до какой-либо небрежности в обращении с огнем в крюйт-камере или даже до входа в крюйт-камеру с огнем вообще.

Но время возникновения пожара как раз тогда, когда в крюйт-камеру должен был итти дневальный для измерения температуры, а также то, что в этот день после полудня предстояла приборка крюйт-камер и погребов, ряд известных случаев предотвращенных или совершившихся взрывов от грубой неосмотрительности низшего персонала при работах или надзоре за взрывчатыми веществами на заводах или лабораториях, — суть обстоятельства, которые дают некоторую допустимость предположению о возможности возникновения пожара от небрежности или грубой неосторожности со стороны бывшего в крюйт-камере, не только без злого умысла, но, может быть, от излишнего усердия.

Из всей прислуги, находившейся в первой башне, спасся тяжко обожженым лишь один человек, и, значит, высказанное допущение остается лишь маловероятным предположением, причем нельзя даже утверждать, был ли кто-либо в это время в крюйт-камере или нет.

III. Комиссия не может не отметить на линейном корабле „Имп. Мария“ существенных отступлений от требований устава по отношению к доступу в крюйт-камеры.

На линейном корабле „Имп. Мария“ имелось два комплекта ключей от крюйт-камер, причем один комплект хранился, как полагается по уставу, а второй, так сказать расходный, хранился у старшего офицера и утром разносился дежурным по погребам артиллерийским унтер-офицером и выдавался на руки старшинам башен или дневальным у погребов, у которых и находился весь день до 7 часов вечера или до окончания работ, после чего вновь сдавался дежурному по погребам унтер-офицеру, а этим последним старшему офицеру.

Первый же комплект, как уже сказано, хранился „под часами“ и считался неприкосновенным.

Порядок этот был установлен как бы обычаем, ибо о нем не было отдано приказа по кораблю, и в показаниях относительно него бывших командиров корабля, ст. офицера, ст. арт. офицера, башенных командиров и старшин башен есть разногласие, указывающее на то, что в этом отношении не было твердо установленных правил, применительно к современным требованиям судовой жизни.

По отношению к самому устройству крюйт-камер существовал ряд отступлений, делавший возможным доступ в крюйт-камеры *даже без всяких ключей во всякое время.*

Люки бомбовых погребов снабжены крышками, которые должны быть всегда заперты на замок. Между тем на корабле „Имп. Мария“ эти крышки не только не запирались, но *они были сняты совсем,* под тем предлогом, что для удобства ручной подачи над люками были поставлены деревянные столы с отверстием, через которые подавались картузы.

Таким образом, бомбовые погреба были в постоянном открытом сообщении с крюйт-камерами.

В бомбовые же погреба можно было проникнуть помимо запертого люка из самой башни.

Но кроме этого, в башне сделаны лазы, через которые можно пройти к ее нижнему штыру. Штыр этот окружен кожухом, которым помещение штыра отделяется от крюйт-камеры, в этот кожух имеется горловина из крюйт-камеры, закрываемая дверцей.

На линейном корабле „Имп. Мария“ *эта дверца не только не имела замка, но была снята совсем во всех башнях,* так что из помещения штыра был открытый ход в крюйт-камеру, а в помещении штыра — открытый ход из самой башни, как через боевое, так и через рабочее и перегрузочное ее отделения.

Ст. арт. офицер корабля, опрошенный по этому поводу, в своем показании высказывается так: „Люк в крюйткамеру из бомбового погреба не запирался. Я не помню, была ли сделана крышка и, следовательно, предполагалось ли запирать ее, но предполагаю, что или я просил не делать ее, или, вернее, сам приказал ее снять, так как через этот люк производилась ручная подача, и для облегчения оной над люками были поделаны деревянные столы с отверстиями для подачи. В кожухе штыра башни было отверстие, двери или заслонки, кажется, не имелось. Тому обстоятельству, что можно было проникнуть из башни, помимо закрывавшегося люка, в бомбовый погреб и в крюйт-камеру, я не придавал значения. Помню, что на линейном корабле „Евстафий“ были устроены заслонки, запиравшиеся на замок, и проникнуть из башни в погреба нельзя было“.

Такой взгляд на невозможность точного исполнения требований устава на современных судах не является единичным.

Так, ст. офицер в своем показании говорит: „Требования устава находились совершенно в другой плоскости, чем требования, предъявляемые каждой минутой жизни корабля. Всегдашние или, вернее, частые попытки совместить эти плоскости были почти всегда болезненны и производили часто впечатление тормозящего дело педантизма“.

Наряду со старшими и младшие офицеры относились к требованиям устава или утвержденным инструкциям без должного внимания.

Так, командир 1-й башни, между прочим, показывает: „В крюйт-камеру можно было проникнуть помимо дверей; можно было проникнуть через элеватор. В кожухе вокруг штырового основания была дверь в крюйт-камеру; иногда эта дверь была заперта, иногда нет“.

Отсюда видно, что командир башни не знал, что эта дверь снята, и не считался с необходимостью точного исполнения статей устава.

Эти выдержки из показаний показывают, что неисполнение требований устава и пренебрежительное к ним отношение, при котором личное мнение ставилось выше даже положительных и определенных указаний закона, составляло явление заурядное. В этом отношении младшие офицеры не имели в старших примеров должного уважения к закону.

IV. На линейном корабле „Имп. Мария“ при стоянке его на якоре производился ряд работ, причем общее число мастеровых, бывавших на корабле, доходило до 150 человек, разделенных на небольшие партии от разных заводов.

Работы производились и по артиллерийской части; между прочим, и в бомбовом погребе первой башни работало 4 человека мастеровых Путиловского завода по установке лебедок.

Мастеровые являлись на корабль около $7\frac{1}{2}$ часов утра и кончали работу в 4 часа дня, кроме тех, которые оставались для экстренных работ, продолжавшихся до 9 ч. 45 м. вечера, или же на ночные работы.

Проверка мастеровых, приезжавших на корабль и съежавших с него, была организована так, что она не давала полной уверенности в том, не остался ли кто из мастеровых на корабле и не прибыл ли кто на корабль самовольно под видом мастерового, ибо правильной поименной проверки на берегу мастеровых, отправляющихся на корабль и возвращающихся с корабля, не велось, — вся проверка возлагалась главным образом на судовой состав.

При прибытии мастеровых на корабль им правильной переклички не делалось, а проверялось общее число людей каждой партии и по вахте сдавалось общее число мастеровых, считавшихся на корабле, поименные же их списки представлялись старшим из мастеровых в каждой партии, каждый день вновь при входе на корабль.

Таким образом, показание мичмана, на вахте которого съехали последние четыре мастеровых Путиловского завода, работавшие в бомбовом погребе 1-й башни, находится в противоречии с показаниями нескольких нижних чинов, которые утверждают, что в ночь с 6 на 7 октября после 10 часов вечера они видели двух мастеровых. Установить в точности справедливость этого показания или опровергнуть его не представляется возможным.

V. Отметив, таким образом, недостаток проверки мастеровых, несоблюдение требований по отношению к доступу в крюйт-камеры, комиссия считает необходимым разобрать и третье предположение о возможной причине возникновения пожара, повлекшего за собою гибель корабля, а именно:

в) злой умысел, — вероятность этого предположения не может быть оцениваема по каким-либо точно установленным обстоятельствам.

Комиссия считает лишь необходимым указать на сравнительно легкую возможность приведения злого умысла в исполнение при той организации службы, которая имела место на погибшем корабле.

1) Крюйт-камеры заперты не были, ибо в них всегда был открытый доступ из самой башни.

2) Башня вместе с зарядным отделением служила жилым помещением для ее прислуги в числе около 90 человек, следовательно, вход и выход из башни кого-либо, особенно в форменной одежде, не мог привлечь ничьего внимания.

3) Чтобы поджечь заряд так, чтобы он загорелся, например, через час или более после поджога и этого совершенно не было видно, не надо никаких особенных приспособлений — достаточно самого простого обыкновенного фитиля. Важно, чтобы злоумышленник не мог проникнуть в крюйт-камеру, после же того, как он в нее проник, приведение умысла в исполнение уже никаких затруднений не представляет.

4) Организация проверки мастеровых не обеспечивала невозможность проникновения на корабль постороннего злоумышленника, в особенности через стоявшую у борта баржу.

Проникнув же на корабль, злоумышленник имел легкий доступ в крюйт-камеру для приведения своего замысла в исполнение.

VI. Сравнив относительную вероятность сделанных трех предположений о причинах возникновения пожара, комиссия находит, что возможность злого умысла не исключена, приведение же его в исполнение облегчалось имевшими на корабле место существенными отступлениями от требований по отношению к доступу в крюйт-камеры и несовершенством способа проверки являющихся на корабль.

СООБРАЖЕНИЯ О ПОДЪЕМЕ ЛИНЕЙНОГО КОРАБЛЯ „ИМП. МАРИЯ“[1]

§ 1. Так как корабль лежит вверх килем, то его подъем расчленяется на две отдельные операции:

I. Собственно подъем.

II. Опрокидывание для приведения вновь в прямое положение.

Для обеспечения успеха необходимо, чтобы обе операции велись так, чтобы корабль все время находился под контролем и не мог бы получать нежелательных кренов, или не мог бы самопроизвольно начать опрокидываться днищем вниз.

При таком самопроизвольном опрокидывании может оказаться, что воздухом сорвет люки или иные заделки отверстий верхней палубы; вместо вырвавшегося воздуха попадет вода, и корабль затонет вновь.

Отсюда явствует, что при подъеме заполнение воздухом должно производиться в такие отсеки, что если бы корабль и сразу оторвался от грунта, и затем, вследствие расширения воздуха, весьма быстро всплыл, то надо, чтобы он все время сохранял остойчивость *днищем вверх* и всплыл бы в этом положении, ибо в противном случае не может быть контроля над кораблем и уверенности в действиях.

Таким образом, прежде всего необходимо рассмотреть условия остойчивости корабля, заполненного воздухом и плавающего днищем вверх.

§ 2. При рассмотрении этого вопроса необходимо различать два случая:

а) корабль не имеет наружной действующей ватерлинии, т. е. плавает днищем вверх, едва касаясь поверхности воды;

б) корабль имеет наружную действующую ватерлинию, т. е. его днище возвышается над водою.

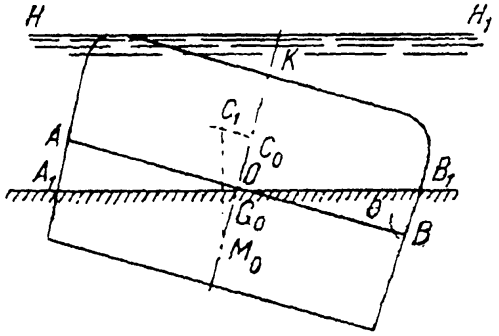
---

[1] Впервые напечатано в сборнике статей „Эпрон“ по судоподъемному, водолазному и аварийно-спасательному делу (1934).

Случай (а). Положим, что корабль плавает днищем вверх (фиг. 1), касаясь горизонта воды HH_1; получим небольшой угол крена θ, так что внутренняя его ватерлиния A_1B_1 не совпадает с накрашенной AB, с которою она совпадала при вертикальном положении диаметральной плоскости корабля.

Пусть C_0 есть центр величины объема AKB, C_1 — центр величины объема A_1KB_1, M_0 — метацентр, соответствующий ватерлинии AB, J_0 — момент инерции ее площади.

Если бы внутри корабля продольных водонепроницаемых переборок не было, то при наклонении действующими отсеками были бы AOA_1 и BOB_1, т. е. совершенно такие же отсеки, как и при наклонении корабля при плавании килем вниз при такой же ватерлинии AB; следовательно, и траектория центра величины будет та же самая, и ей будет соответствовать тот же самый метацентр M_0, как и при прямом нормальном положении корабля.



Фиг. 1.

Это положение точки M_0 определяется метацентрическим радиусом C_0M_0, величина которого дается формулой

$$C_0M_0 = \frac{J_0}{V_0}$$

где V_0 есть объем AKB, представляющий начальное водоизмещение корабля, который теперь заполнен воздухом.

Чтобы корабль был остойчив в этом положении днищем вверх, необходимо, чтобы центр тяжести его лежал *ниже* метацентра M_0.

Но, так как до опрокидывания корабль плавал, имея тот же метацентр M_0, то центр тяжести его лежит где-либо в точке G_0, между M_0 и C_0, и значит, при отсутствии водонепроницаемых продольных переборок, препятствующих образованию действующих отсеков AOA_1 и BOB_1, положение корабля днищем вверх было бы не остойчивое и, значит, он в нем плавать не может, стремясь сам собою вернуться в положение килем вниз.

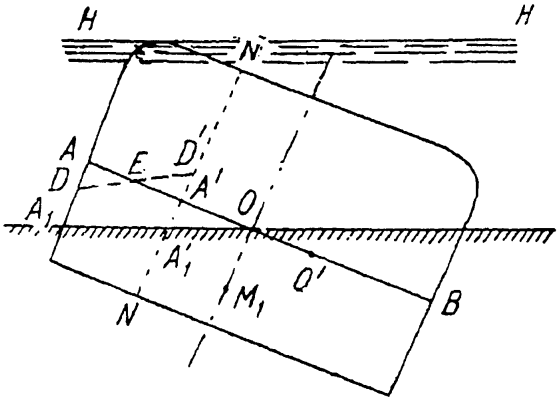
Понятно, что важно образование или необразование действующих отсеков AOA_1 и BOB_1; так, например, если бы по ватерлинии корабля AB была непроницаемая палуба, то при наклонениях корабля точка C_1 оставалась бы постоянно в совпадении с точкою C_0; в этой точке лежал бы и метацентр M_0 и для остойчивости днищем вверх было бы достаточно, чтобы центр тяжести G лежал ниже C_0.

§ 3. Если корабль имеет продольную непроницаемую переборку NN, то при наклонении его на тот же малый угол θ, действующий отсек будет не AOA_1, а $A'OA_1'$, и отсеки DEA и $D'EA'$ (фиг. 2).

Поэтому для получения метацентра M_1 надо брать не полный момент инерции J_0, а лишь момент инерции части $A'OB$ и присовокупить к нему момент инерции площади AEA', взятый относительно ее оси E, т. е. надо взять

$$C_0 M' = \frac{J_0 - \sigma \cdot b^2}{V_0}$$

где σ есть площадь AA' и $b = EO'$ есть расстояние между осью E, проходящей через центр тяжести площади σ, и осью O', проходящей через центр тяжести остающейся площади.

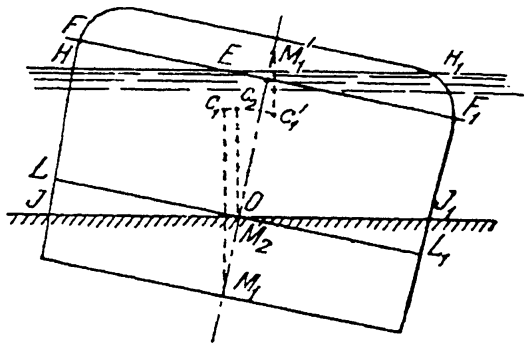


Фиг. 2.

Когда площадь σ мала, по сравнению с AB, или переборки симметричны с обеих сторон, то оси O' и O можно считать совпадающими.

Мы не будем разбирать влияние расширения воздуха в отдельных случаях, ибо при малых наклонениях оно существенного значения не имеет.

§ **4.** Для корабля „Имп. Мария“ скосы нижней палубы, переборки угольных ям, продольные броневые переборки имеют самое существенное значение, ибо при заполнении воздухом по нижнюю палубу и непроницаемости переборок угольных ям метацентрическое расстояние C_0M' составит около $\left(\frac{66}{90}\right)^3 C_0M_0 = \left(\frac{11}{15}\right)^3 C_0M_0$, т. е. около 0.40 C_0M_0, и центр тяжести G_0 будет ниже M' и, значит, корабль будет остойчив днищем вверх, а так как при этом он будет иметь и некоторый избыток водоизмещения, то у него будет и некоторая наружная ватерлиния, еще увеличивающая его остойчивость.



Фиг. 3.

§ **5.** Случай (б). Положим, что корабль плавал, имея наружную ватерлинию FF_1 и внутреннюю LL_1 (фиг. 3). Объем FLL_1F_1 при этом равен водоизмещению V_0 корабля, которое равно его весу. Пусть C' есть соответствующий этому объему центр величины. От действующих отсеков LOJ и L_1OJ_1 при внутренней ватерлинии центр величины, при наклонении на угол θ, переместился бы в точку C_1, которой соответствует метацентр M_1, определяемый длиною радиуса

$$C' M_1 = \frac{\text{мом. инер. пл. } LL_1}{V_0}$$

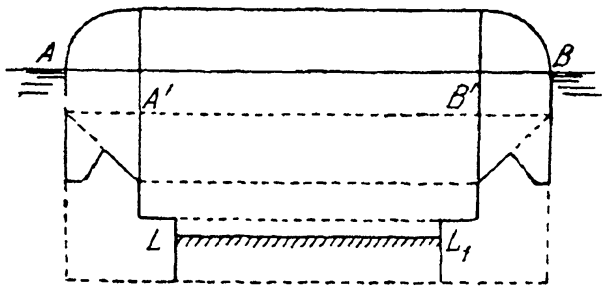
От действующих отсеков FEH и F_1EH_1 центр величины переместится из точки C' в точку C_1', которой соответствует метацентр M_1', определяемый длиной радиуса

$$CM_1' = \frac{\text{мом. инер. пл. } FF_1}{V_0}$$

От совокупности обоих влияний центр величины перейдет в точку C_2, которая получится, отложив $C_1C_2 = C'C_1'$. Этой точке C_2 соответствует метацентр M_2, причем

$$C'M_2 = C'M_1 - C'M_1'$$

Чтобы корабль был остойчив, плавая днищем вверх и имея ватерлинию FF_1, необходимо, чтобы центр тяжести его лежал ниже метацентра M_2.



Фиг. 4.

§ **6.** Отсюда ясно, насколько важно для сохранения остойчивости днищем вверх всякое уменьшение и ограничение действующих отсеков при *внутренней* ватерлинии. На линейном корабле „Имп. Мария“ к таковому ограничению имеется полная возможность: обеспечив водонепроницаемость частей, обведенных сплошною чертою (фиг. 4) по всплытии корабля, первоначально наполненного воздухом по линии $A'B'$, получим наружную ватерлинию AB, идущую несколько ниже шельфа, т. е. ближе к килю, и внутреннюю LL_1 между батарейною и верхнею палубами.

В этом положении и во всех промежуточных при всплывании, благодаря переборкам угольных ям, корабль остается остойчивым и, значит, обеспеченным от самопроизвольного переворачивания в прямое положение.

§ **7.** Из предыдущего анализа вытекает и тот общий порядок и последовательность, которых необходимо придерживаться при подъеме:

1) Прежде чем приступить к каким-либо из нижеперечисленных работ, необходимо убедиться, в каких из главных отсеков корабля находится воздух (если таковой остался), и определить давление его, поставив манометрические трубки.

2) В каждое из главных судовых отделений придется сделать шлюзную шахту, подобную употребляемым при кессонных работах. Укрепление этой шахты с днищем удобнее всего будет делать при помощи вспомогательного кессона, дабы избежать водолазных работ.

3) Нагнетая воздух поочередно в каждые два или три смежных отсека, обращают их как бы в кессон и производят в них необходимые работы по обеспечению воздухонепроницаемости переборок броневых и переборок угольных ям.

4) По подготовке отсеков надо накачивать воздух во все отсеки так, чтобы получить внутреннюю ватерлинию приблизительно на уровне грузовой ватерлинии корабля.

Таким образом, корабль будет иметь избыток плавучести около 4000 т, так как башни его вывалятся.

5) Кормовую боевую рубку от палуб батарейной и верхней предварительно нужно будет отделить или обрезкой газом или взрывом тетриловых зарядов.

6) Держа избыток плавучести, промывать грунт под кораблем струями воды или воздуха, чтобы дать под корабль доступ воде и устранить прилипание его к грунту.

7) Как только это прилипание будет в достаточной мере устранено, корабль всплывает сразу и будет плавать вверх килем в том положении, которое указано выше.

8) После того как корабль всплывет, его нужно подготовить к опрокидыванию в прямое положение.

§ 8. При опрокидывании корабля в прямое положение необходимо считаться с тем обстоятельством, что при плавании вверх килем воздух внутри корабля будет сжат до давления, близкого к одной атмосфере (15 фунтов на 1 кв. дюйм), поэтому, когда палуба подойдет к уровню воды или оголится, ее оголившаяся часть и все люки ее или заделки будут испытывать новое давление изнутри внаружу. При значительной площади таких заделок пришлось бы разрабатывать и устраивать очень сложную систему их крепления. Вырывание такой заделки могло бы повести к потоплению корабля.

Отсюда ясно, что выгоднее не подвергать палубы таким усилиям, к которым они не приспособлены, и применить несколько иную методу, а именно: батарейную палубу сделать водонепроницаемой, заделав в ней люки, кожухи над котлами, отверстия башен и прочее так, чтобы обратить ее как бы во временное днище корабля. Когда эта работа (правда, довольно сложная и большая) будет выполнена, то воздух из корабля выпустить, т. е. открыть сообщение с наружным воздухом всех отсеков, или оставить в них небольшой избыток давления (3—5 фунтов на 1 кв дюйм), заделать отверстия в днище и убрать кессонные и шлюзные шахты, — корабль будет плавать как обыкновенное надводное судно. Залить водою угольные ямы и бортовые отсеки одного борта и междудонные отделения, — корабль опрокинется в положение палубой вверх, имея крен 15—20° на сторону затопленных угольных ям, откачав из которых воду, приводят его в прямое положение.

§ 9. Само собою разумеется, что все намеченные операции необходимо сперва проверить подробными расчетами, чтобы в точности знать, в каких условиях будет находиться корабль.

Эти расчеты должны заключать:

а) расчет положения метацентров для различных внутренних ватерлиний, начиная от той, при которой объем воздуха становится равным водоизмещению корабля, и кончая той, которая соответствует расширившемуся объему воздуха по всплытии корабля, принимая как действительную нагрузку корабля, так и существующие в нем переборки;

б) по накачивании воздуха, когда будет доступ в отсеки, поврежденные взрывом, необходимо обратить внимание на стрингера батарейной, а если окажется возможным, и верхней палубы и проверить расчетом, принимая во внимание их разрушение и продольную крепость, дабы не переломить корабля, если кормовая его часть освободится от прилипания к грунту, а носовая еще нет.

Промывание грунта необходимо будет вести, считаясь с этим обстоятельством, т. е. надо обеспечить плавучесть носовой части и отсутствие присасывания ее.

О ПРОЕКТЕ СТАНДАРТА ТАБЛИЦ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ[1]

А

Полезно предпослать таблицам[2] введение, содержащее основные положения об обеспечении непотопляемости и остойчивости корабля,[3] а именно:

а) корабль плавает и обладает остойчивостью за счет целости и водонепроницаемости своего **НАДВОДНОГО** борта, ибо этим обеспечивается запас плавучести и остойчивости;

б) одной из главных обязанностей дивизиона живучести является возможно быстрая заделка *надводных* пробоин в борту и палубах. Такая заделка пробоин в борту значительно облегчается, если надводный борт прикрыт даже *тонкой* броней, в которой входные отверстия от снаряда не имеют развороченных кромок, требующих сравнительно медленной газовой резки;

в) при самом составлении проекта корабля должно быть тщательно разработано подразделение трюма и надводной части *главными* поперечными переборками, доводимыми без уступов до верхней из главных палуб корабля. На коммерческих судах этого достигают пользуясь кривой допустимой длины затопляемых отсеков. На военных кораблях эта кривая бесполезна, ибо длина отсеков определяется расположением башен и подбашенных устройств, в том числе бомбовых погребов, крюйт-камер, патронных погребов, котельных и машинных отделений. Соответственно распределению этих главных отсеков и наибольшему изменению осадки корабля при затоплении двух смежных из них и определяется бронирование корабля, нижний толстый пояс брони должен обеспечивать боевую плавучесть **после**

---

[1] Публикуется впервые.

[2] В отзыве о проекте стандартов таблиц непотопляемости я ограничиваюсь для определенности предположением, что стандарт относится к броненосцу.

[3] Телеграмма адмиралу Макарову (см. Приложение) является как бы дополнением к п. А моего отзыва. Как видно, за протекшие с того времени 37 лет изложенные в этой телеграмме принципы остались без существенных изменений. Само собою разумеется, что не столько важны таблицы и стандарт для них, сколько тщательно разработанное подразделение трюма и система затопления отсеков.

выравнивания корабля, а верхний более тонкий — боевую остойчивость до выравнивания корабля;

г) при указанном в п. (в) бронировании, согласованном с подразделением трюма, будет достигнуто то, что корабль, получив даже такую минную пробоину, вследствие которой будет залито два смежных отсека, останется на плаву и не опрокинется, хотя и получит значительный крен и дифферент; тогда задачей выравнивания является восстановление *управляемости* корабля. Если же размеры повреждения *больше* тех, на которые проектировано подразделение трюма, то корабль, получив такое повреждение, потонет или опрокинется ранее того, чем поспеют принять какие-либо меры к предотвращению его гибели;

д) прежде при распределении переборок делали ту ошибку, что в трюме ставили много *лишних* водонепроницаемых переборок и недостаточно подразделяли надводные части корабля, как бы забывая, что после аварии они станут подводными.

е) таким образом, одно из главных назначений „Таблиц непотопляемости" состоит в изучении при *самом составлении проекта* корабля соответствия бронирования подразделению трюма, которое само определяется распределением башен и их погребов, котлов и главных механизмов корабля;

ж) при этом надо иметь в виду, что следует избегать образования большого крена при аварии, в этом смысле *продольные* переборки в трюме, кроме бортовых и противоминных, *вредны*, а в надводной части *полезны*;

з) бортовые и противоминные отсеки следует подразделять легкими поперечными полупереборками, доводимыми лишь до толстой противоминной переборки;

и) палубные люки должны быть устроены так, чтобы они могли выдерживать напор воды как сверху, так и снизу, чтобы обеспечивать водонепроницаемость палуб при аварии;

к) выход людей из трюмных отсеков должен быть обеспечен шахтами при задраенных палубных люках.[1]

Составление предварительных таблиц непотопляемости при проектировании корабля и обеспечит проверку всех этих положений не после того, как корабль построен и готов к плаванию и когда переделки и исправле-

---

[1] На броненосцах типа „Бородино" эти шахты были выведены на батарейную палубу и расположены в 12 футах от борта, имели комингсы по 7 дюймов. При крене в 18—20° они уходили под воду и при открытых пушечных портах 75-миллиметровых орудий кочегарные отделения броненосца „Орел" залило при известной его аварии через эти шахты.

24 апреля 1904 г. об этом мною был подан рапорт председателю Морского технического комитета, авария броненосца „Орел" произошла 6 мая. В моем рапорте было указано, как устранить этот недостаток, что и было немедленно исполнено на судах постройки Балтийского завода, по приказанию начальника завода.

„Орел" строился на Адмиралтейском заводе. Таким образом в 1001-й раз подтвердились слова Петра: „Промедление времени смерти безвозвратной подобно".

ния недостатков практически невозможны, а тогда, когда для этого потребуется только пятикопеечная резинка и карандаш.

Командир дивизиона живучести должен изучить эти основные положения кораблестроения, чтобы вполне сознательно принимать необходимые меры в бою или при аварии.

Б

Существующий стандарт ВСТ-76 мне прислан не был, и я не мог сравнить его с проектируемым, поэтому дальнейшие замечания относятся только к проектируемому стандарту.

1) В стремлении сделать таблицы непотопляемости такими, чтобы на бумаге они давали возможно точные результаты (на практике не достижимые и не нужные), им придана сложность, затрудняющая пользование этими таблицами.

В самом деле, к стандарту пришлось приложить целый катехизис из 77 правил. Таблиц четыре сорта, некоторые из них заключают по 27 столбцов и столько строк, сколько отсеков в корабле и все-таки в них опущен весьма важный элемент, именно а) *время*, потребное на затопление каждого отсека, и указание на то, как отсек затопляется: от специального кингстона, от балластного насоса, от водоотливной системы и т. п., б) время откачки воды из отсека.

Эти указания необходимы, чтобы, выбрав затопляемые для выравнивания корабля отсеки, командир дивизиона живучести ясно сознавал, что *намеренное* затопление *неповрежденных* отсеков для выравнивания корабля происходит гораздо медленнее, нежели поврежденных даже при ничтожной пробоине, поэтому эффект затопления проявится не тотчас же после отдачи команды, а через значительное время и какое именно. Если не сообразоваться с этим и проявлять торопливость, то могут быть затоплены и такие отсеки, затопление которых не нужно, и корабль будет перекренен или передифферентован (гибель броненосца „Гангут“).

Теоретические же неправильности таблиц самого простого образца не имеют существенного значения, ибо если командир дивизиона живучести будет по часам следить, как происходит выравнивание корабля с *течением времени*, то перекренивания или передифферентования он или совсем не допустит, а если и допустит, то столь малое, что *откачкой* воды из соответствующих неповрежденных отсеков он быстро доведет и крен и дифферент до требуемых границ.

2) Таблицы, в том же стремлении к избыточной и ненужной, практически недостижимой точности, рекомендовано вычислять для каждого отсека в отдельности с „точностью для крена 0°.1 и угол дифферента до 0.0001 радиана“.

Для самого длинного корабля (300 м) углу дифферента в 0.0001 соответствует дифферент в 3 см, т. е. $1\frac{1}{4}$ дюйма. Видимо такая точность

взята в предположении, что все погрешности будут одного знака, так что совокупная погрешность будет пропорциональна числу затопляемых отделений, но эти погрешности не систематические, а *случайные*, и совокупная погрешность будет пропорциональна не самому числу затопленных отделений, а примерно корню квадратному из этого числа, поэтому точность вычисления крена достаточна до 0°.5, угла дифферента — до 0.001, т. е. до 0°.005; но лучше угла дифферента совсем не вычислять, а показывать в таблице изменения: среднего углубления ε, носового Δ_1 и кормового Δ_2, тогда число аргументов в таблице значительно сократится, и пользование ими упростится.

3) В объяснении к таблицам указан порядок, в котором следует затоплять отсеки; к этому указанию надо добавить, что если пробоина не есть первая, то надо сперва выбрать те отсеки, из которых воду надо *откачать*, ибо отсеки, залитые через вторую пробоину, иногда выравнивают влияние затопления отсеков через первую пробоину (случай с пароходом „Садо-Мару“ в 1904 г.).

Как уже сказано, командир дивизиона живучести должен все время следить по часам, в какой мере отсеки заполнены, если только нет автоматической централизованной системы указателей высоты воды в отсеках, подобно тому как на нефтеналивных судах для товара.

Но здесь, в п. 49, надо добавить, что на боковой и килевой качке корабля показания кренометра и дифферентометра не надежны, ибо эти приборы будут показывать розмахи качки, а не статическое положение равновесия и надо заметить несколько (10—12) розмахов направо и налево, чтобы, взяв среднее, исключить влияние качки, и повторить эту операцию несколько (4—5) раз, чтобы по согласию результатов убедиться в достаточной их точности. Для большого корабля эта операция потребует около 6—8 минут времени, тогда как определение номеров и наименований отсеков, залитых водою, при налаженной службе дивизиона живучести может быть произведено и быстрее, если установлены самые простые указатели затопления, не говоря уже о централизованной их системе.

В том и другом случае, т. е. когда определен суммарный крен и дифферент или определены поврежденные отсеки, надо, пользуясь расчетными данными, показанными в столбцах II и III, и по ним соответственно столбцами VI и VII, выбирать отсеки, подлежащие затоплению.

При этом выборе надо сообразоваться со столбцом XIII, чтобы сперва затоплять такие отсеки, которые дают увеличение метацентрической высоты, в особенности если вода выступила на нижнюю палубу.

Этот выбор отсеков, подлежащих затоплению, должен быть в наставлении обязательно пояснен рядом примеров, которые по словам Ньютона „не менее поучительны, нежели правила“.

Для последующего затем более точного выравнивания надо сберечь с каждого борта по несколько бортовых отсеков, дающих около 5° крена, и несколько малых концевых порожних отсеков в носу и корме, дающих

примерно дифферент около $\frac{1}{250}$ длины корабля, которые затем постепенно и последовательно заполняются для окончательного выравнивания, причем никаких расчетов делать не надо, а достаточно пользоваться числами той же табл. 3, а всего проще глазомером.

5) Расчеты группового затопления вносить в табл. 3 не следует. Эти расчеты можно и должно делать для *упражнения* в пользовании таблицами и вносить в отдельную тетрадь или книгу, но не загромождать табл. 3, в которой данные в столбцах XVI, XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII XXIII, XXIV вносятся лишь при действительной аварии корабля, и эта таблица, удостоверенная надлежащими подписями, служит подобно вахтенному журналу документом при судебном разбирательстве аварийного дела.

6) Расчеты во втором приближении, если поступать как здесь указано, при действительной аварии производить бесполезно, а при боевой обстановке невозможно.

Эти расчеты или даже более точные следует сделать по отношению к дифференту, чтобы получить данные о том, какова погрешность от того, что обводы приняты прямостенными. Результаты этих расчетов можно занести в упомянутую выше тетрадь в функции дифферента.

7) Проф. В. Г. Власов разработал другой стандарт, основанный на наблюдении крена и дифферента, происходящего от затопления пробного отсека.

Эта метода, теоретически вполне правильная, едва ли окажется применимой на корабле, качающемся даже на небольшой зыби, по следующим причинам:

а) Как указано выше, наблюдения изменения крена и дифферента должны считаться от положения равновесия корабля при залитых вследствие пробоины отсеках; эти наблюдения даже при малых размахах боковой и килевой качки корабля требуют около 6—8 минут времени.

б) Когда корабль находится в плавании, то в нем есть много отсеков, заполненных жидкими грузами, как то пресною водою для котлов, жидким топливом и пр., причем эти жидкости *не запрессованы* и, имея свободную поверхность, при затоплении пробного отсека будут переливаться; может казаться, что влияние этого переливания исключается. Это и было бы, если бы отсеки, заполненные жидкостью, были достаточно высоки и ограничены только вертикальными переборками, но обыкновенно они низкие и сверху ограничены платформами, внутренним дном и т. п., вследствие чего при наклонениях корабля форма граничащей поверхности изменяется, и учет этого изменения практически неосуществим по его сложности.

При затоплении пробного отсека, даже если его запрессовать, изменения крена и дифферента будут происходить не только от приема вполне определенного груза, но и от вышеуказанного переливания, которое не может быть предвычислено. Поэтому пробный отсек должен быть

выбран настолько большим, чтобы указанное вредное влияние было ничтожно мало по сравнению с влиянием пробного отсека.

Мне много раз приходилось определять положение Ц. Т. корабля как переносом балласта, так и перекачкою воды в бортовых отсеках, и хотя принимались все обычные предосторожности, при малых (до 2°) кренах оставались чувствительные погрешности и лишь при кренах свыше 5° получались согласные результаты, как то обнаруживалось при обработке наблюдений.

Поэтому, применяя методу пробного отсека, надо брать такой отсек или отсеки, которые давали бы изменение крена около 10—8° и изменение дифферента около $\frac{1}{150}$, $\frac{1}{200}$ длины корабля.

Малые бортовые и концевые отсеки надо приберегать для окончательного выравнивания корабля, а в больших находятся всегда разные грузы, и коэффициенты заполнения этих отсеков известны далеко не с требуемою для этого способа точностью.

Таким образом, способ, кажущийся совершенным, на практике окажется далеко не столь точным, как это кажется теоретически, и не будет точнее указанного в первом стандарте; применяя окончательное выравнивание так, как указано выше, пользуясь оставленными про запас малыми отсеками, можно ограничиться табл. 3.

На основании изложенного я полагаю, что следует ограничиться первым стандартом и вопреки погоне за недостижимой и ненужной точностью первоначального выравнивания стремиться к упрощению стандарта, а не усложнению его.

В

В присланном мне проекте нет стандарта, вычисленного для примера для какого-нибудь из плавающих судов по предлагаемым образцам; таким образом все суждения являются чисто умозрительными и численно не обоснованными, поэтому прежде чем проекты представлять на утверждение необходимо:

1) По каждому из стандартов составить для того же самого корабля соответствующи· таблицы.

2) Задать одно и то же повреждение и провычислить для него точное положение равновесия при крене и дифференте.

3) Выравнять корабль, применяя каждый из стандартов как предварительно по табл. 3, так и окончательно, применяя методу, указанную в наставлении, так и пользование оставленными про запас малыми отсеками.

4) При применении методы пробного отсека принять условно погрешность в крене и дифференте в 5% от истинной их величины для пробного отсека, объем которого, или сумму объемов пробных отсеков, одно

временно затопленных, подбирают так, чтобы изменение крена было не менее 8°, и изменение дифферента не менее $\frac{1}{250}$ длины корабля.

5) На основании результатов этого исследования *расчетного*, а не *разговорного*, и установить представляемый на утверждение стандарт, внеся в него и данные потребного на затопление каждого отсека в отдельности времени.

Приложение

Принципы обеспечения непотопляемости военных судов

В марте 1902 г. адмирал С. О. Макаров подготовлял лекцию „О непотопляемости военных судов," которую он намеревался прочесть в зале Морской библиотеки.

Посетив Опытовый бассейн, которым я тогда заведывал, адмирал пожелал видеть опыт опрокидывания модели броненосца „Петропавловск", построенной по его системе, и решить, можно ли этот опыт показать большой аудитории. Оказалось, что это потребовало бы сложных и громоздких устройств, и от этого поучительного опыта пришлось отказаться.

Тогда же адмирал ознакомил меня вкратце с содержанием своей лекции и предложил мне после его лекции выступить и высказать вкратце основные принципы обеспечения живучести и непотопляемости корабля, предоставляя на это 7—10 минут времени.

Я тогда написал то, что я буду говорить, или, точнее сказать, то, что я прочту, и ввиду спешности послал адмиралу следующую телеграмму в 500 слов (тогда слово телеграммы в Кронштадт стоило 1 копейку) и немедленно получил одобрительный ответ.

Вот копия этой телеграммы:

„Кронштадт адмиралу Макарову.

„1) Часто говорят: «непотопляемость корабля обеспечивается подразделением трюма на отсеки». Это выражение не точно. Непотопляемость обеспечивается *запасом плавучести* корабля. Запас же плавучести есть объем надводной части корабля, ограниченный верхнею из водонепроницаемых палуб. Подразделение трюма на отсеки есть одно из средств для использования запаса плавучести.

„2) Кроме плавучести необходимо обеспечить и остойчивость корабля. Этого возможно достигнуть соответствием подразделения надводных частей подразделению трюма и устройством надлежащей системы затопления отделений для выравнивания корабля. Лишь такое выравнивание дает возможность использовать весь запас плавучести. Водоотливная система бессильна в борьбе с пробоинами. При подразделении трюма и надводных частей надо руководствоваться расчетами влияния затопления отделений на крен, дифферент и остойчивость. Принцип же подразделения должен

быть тот, чтобы плавучесть утрачивалась ранее остойчивости — короче, *чтобы корабль тонул не опрокидываясь.*

„3) Всякое повреждение *надводного* борта влечет за собой соответствующее уменьшение запаса плавучести и остойчивости корабля. Желание обеспечить этот запас в бою повело к изменению в системе бронирования судов. Прежде назначение брони видели в прикрытии машины, котлов, вообще жизненных частей корабля, для обеспечения плавучести считали достаточным небронированного надводного борта. Развитие скорострельной артиллерии заставило изменить систему бронирования, рассматривая как главное ее назначение, — обеспечение запаса плавучести и остойчивости корабля.

„4) Естественное развитие первой системы бронирования вело к сосредоточению всех жизненных частей корабля в средине его и прикрытию этой части возможно толстою бронею при возможно *меньшей* ее площади.

„5) Вторая система, обратно, требует прикрытия возможно большей площади борта бронею, повсюду одинаковой толщины или даже более толстою в оконечностях.

„6) Во многих случаях практики обе системы как бы соединяют, прикрывая среднюю часть корабля по ватерлинии более толстою бронею, остальной борт — бронею повсюду одинаковой толщины.

„7) Всякая броня пробивается орудием надлежащего калибра в пределах определенных углов попадания и дальности, отсюда является возможность уравновешивания вероятностей, имея перевес в артиллерии над более сильно бронированным противником, нанести ему в одинаковое время такую же площадь пробоин, как и ожидать от него. Таким образом, вопрос о борьбе брони и артиллерии по отношению к непотопляемости может быть сведен к числовым расчетам вероятностей и математического ожидания площади пробоин, совершенно подобным расчетам эмеритальных касс и иных страховых предприятий.

„8) Рациональное бронирование, кроме того, должно быть в определенном соответствии с подразделением трюма на отсеки, а это последнее — с радиусом разрушения от минной пробоины.

„9) До сих пор при составлении проектов боевых судов производились по большей части те же расчеты остойчивости, которые имели значение для судов парусных, а при суждении о столь важном качестве, как живучесть, или непотопляемость корабля, довольствовались не расчетами, точными и определенными, а общими соображениями, попросту говоря — разговорами. От этого произошли многие недостатки, как, например, на одних судах подразделение жилой палубы по числу отсеков совершенно не соответствует подразделению трюма: повреждение палубы и надводного борта слишком сильно отражается на уменьшении остойчивости, в трюме имеется множество мелких отсеков, объемом в 10 т и меньше рядом с отделениями в 800 т, диаметральная переборка в котельном отделении сделана *без дверей*, так что при ударе тараном по средине броненосец

опрокинется раньше, нежели поспеют подумать, что следует предпринять против его гибели. На других судах впали в противоположную крайность, совсем не делая диаметральной переборки, как бы забыв, что это есть одна из основных связей корабля. Все это потому, что расчетам не доверяют, основных принципов для них не устанавливают, а тогда нет и оценки требований от боевого корабля. Недаром сказано в Писании: «вся числом и мерою сотворил еси». Всякое рациональное творчество и должно быть основано на «числе и мере». Вместе с тем надо помнить, что сознание недостатков есть первая ступень к их исправлению.

„Прочтение всего здесь изложенного требует 4 минут времени.

Капитан *Крылов*".

РЕЦЕНЗИИ НА КНИГУ „THÉORIE DU NAVIRE“

Theorie du Navire par J. Pollard et A. Dudebout. Tome I. Paris. 1890. 8°. LIV + 354.[1]

В конце прошлого года вышел 1-й том теории корабля профессоров парижской Ecole du G'enie Maritime Поллара и Дюдебу. Этот том посвящен кораблестроительным вычислениям и геометрии корабля. Все же сочинение будет состоять из четырех томов, общее содержание которых будет следующее: 2-й том — статика корабля и качания корабля на тихой воде. 3-й том — исследование волнового движения, качка на волнении, сопротивление воды поступательному движению судна. В 4-м томе будут изложены: теория поворотливости и действия руля, действие ветра на паруса, теория употребляемых движителей и, наконец, — исследование сотрясений судна от действия гребного винта. В настоящей заметке мы постараемся ознакомить с содержанием 1-го тома этого сочинения, а по мере выхода будем давать отчет и о следующих.

Вначале дан весьма подробный систематический указатель литературы по всем отделам теории корабля, начиная с 1607 г. и до 1889 г. Указаны не только отдельные сочинения по этому предмету, но и статьи периодических изданий; этот список занимает 50 страниц и содержит около 500 названий сочинений и статей. Из сочинений русских авторов указаны: „Теория и практика кораблестроения“ М. Окунева и мемуар Остроградского „Sur la propagation des ondes“.

Содержание 1-го тома разделено на две части: в первой, заключающей главы I—XII, изложены приемы кораблестроительных вычислений; во второй, в главах от XIII до XVIII, — собственно геометрия корабля.

Глава I. Кораблестроительные вычисления, как известно, сводятся почти все на приближенное исчисление некоторых определенных интегралов, простых и кратных; в начале первой главы и дан перечень всех этих употребительнейших интегралов, как то: для вычисления площадей кри-

---

[1] Рецензия на том I впервые напечатана в „Морском сборнике“ (1891, № 3).

вых, статических моментов, моментоз инерции площадей, объемов и поверхностей, статических моментов и моментов инерции для тел и прочее.

Глава II посвящена изложению способов приближенного исчисления перечисленных интегралов: по правилу трапеций, причем для уменьшения происходящих от вычисления по этому способу погрешностей рекомендуется прибавлять к вычисленному по обыкновенному правилу результату величину $\frac{a}{16}(y_1 - y_0) + \frac{a}{16}(y_n - y_{n-1})$, где a — промежуток между ординатами, y_0 и y_n — крайние ординаты. Далее излагаются: малоупотребительное правило Пуассона, правило Понселе, первое и второе правила Симпсона, формулы, аналогичные правилам Симпсона и основанные на замене частей кривой параболами четвертой, пятой и шестой степеней. Для правила Симпсона не дается удобных выражений для предела возможных погрешностей, хотя этот вопрос и разработан с полною подробностью акад. А. А. Марковым в его „Исчислении конечных разностей". Далее излагается способ Вуллея для вычисления объемов, основанный на замене частей поверхности, ограничивающих сверху части вычисляемого объема и проектирующихся на плоскость xy в виде прямоугольников, частями двух косых плоскостей (гиперболических параболоидов). Вычисление по этому правилу совершенно подобно вычислению по правилу Симпсона, но требует меньшего числа ординат, ибо многие из них имеют множителем 0. Нам кажется странным, почему авторы, излагая общий вывод интерполяционной формулы Ньютона лишь для того, чтобы указать связь ее с формулами Симпсона, совершенно не упоминают о формулах квадратур Чебышева и Гаусса, дозволяющих без ущерба точности ограничиваться значительно меньшим числом ординат, нежели надо в формулах Симпсона и трапеций.

Глава III посвящена изложению способов графического интегрирования и свойств кривых, производных от данной кривой и первообразных. Под этими названиями должно разуметь следующее: если дана кривая $y = f(x)$, то, взяв кривую $\frac{dy}{dx} = y' = f'(x)$, мы получим кривую, производную от данной, а взяв кривую $Y = \int_a^x f(x)\,dx$, получим первую первообразную от данной $f(x)$. На основании этих свойств выводится весьма простой способ Жмурко графического интегрирования и способ Фруда. Эти способы особенно полезны при исчислении изгибающих моментов, когда известна кривая действующих усилий.

Глава IV посвящена описанию и теории планиметров и интеграторов, между прочим Амслера, Марселя, Депре и интеграфа Абданк-Абакановича. Эти четыре главы и представляют собой как бы введение, заключающее в себе общее изложение и теорию всех кораблестроительных вычислений.

В главе V излагаются вычисления водоизмещения, центра величины, начального метацентра и прочих данных для корабля в прямом положе-

нии. Объяснив в общем теоретический чертеж и те линии, которые на нем наносятся, авторы приводят официальную инструкцию, сообразно которой должны составляться теоретические чертежи военных судов; как одну из особенностей этой инструкции отметим, что теоретические и общие практические чертежи должны составляться в следующих масштабах:

10 мм за метр для судов длиною в 100 м и свыше, 15 мм за метр для судов длиною от 50 до 100 м, 30 мм за метр для судов длиною меньше 50 м, 50 мм за метр для шлюпок.

Объяснив затем в общих чертах составление теоретического чертежа, приводится перечень тех сведений, которые должны быть приложены к чертежу, излагаются приближенные приемы исправления оконечностей для удобства вычислений и объясняется расположение всех вычислений в табличной форме, облегчающей как производство их, так и контроль для устранения возможных ошибок. Вычисления производятся по способу трапеций и для сказанных таблиц отпускаются печатные бланки. При вычислениях число ватерлиний — 10 и шпангоутов — 20. Как одну из особенностей укажем, что при вычислении водоизмещения вычисляют еще и водоизмещение слоя между грузовой ватерлинией № 10 и ватерлинией № 11, лежащей выше грузовой на $\frac{1}{10}$ часть углубления. Затем объясняется графическое изображение результатов всех вычислений для корабля в прямом положении, т. е. грузовой размер, метацентрическая диаграмма, строевая и пр., и в заключение этой главы приводятся известные приближенные формулы Нормана и формулы Альбаре для вычисления положения центра величины и метацентра.

Остальные главы первой части трактуют о вычислении перемещения центра величины при больших наклонениях судна; для этого предложено множество различных приемов. Авторы предварительно излагают приемы графической интерполяции и графического решения вопросов, вроде следующего: дана кривая (графическая) $y_1 = \varphi(x)$ и кривая $y_2 = f(x)$, исключить из этих двух уравнений x, т. е. построить кривую $y_1 = \psi[f(x)] = \psi(y_2)$.

На этом способе графической интерполяции основаны некоторые способы вычислений элементов остойчивости, как о том будет сказано ниже. Первый из предлагаемых приемов есть прием Бенжамена и Спенса, которые проводят для каждого наклонения α ряд ватерлиний, составляющих с грузовою в прямом положении угол α, и вычисляют ординаты центров величины последовательных отсеков судна, считаемые от вертикальной плоскости, проходящей через средину киля, или лучше, проведенную вне обводов судна, а также и объемы этих отсеков. Результаты вычислений изображаются графически, и найдя ординату центра величины для заданного наклонения и водоизмещения, весьма легко найти и плечо статической остойчивости при сказанных условиях. Для производства вычислений составлены бланки, по которым рекомендуется брать 21 шпангоут и 10

ватерлиний, т. е. для вычисления кривой горизонтальных перемещений центра величины, для одного угла наклонения и для разных водоизмещений (10) надо снять 420 ординат с чертежа и заполнить сорок столбцов бланка, по 21 числу в каждом. Это одно показывает длинноту способа, не говоря уже о необходимости вычертить полные шпангоуты, а не половины их, как обыкновенно на корпусе, и упрощение его, если бы вместо формулы трапеций была бы взята другая более точная, т. е. требующая меньшего числа ординат формула квадратур. Феллоу для выполнения вычислений остойчивости по способу Бенжамена-Спенса предложил особый прибор. Кувенберг и М. Грей упростили несколько прием Феллоу, а также и самый способ Спенса.

В главе VIII показан способ построения так называемого *масштаба Бонжана* и выяснены его свойства, затем указаны приемы Россин и Клозеля вычисления статической остойчивости, где, как и для масштаба Бонжана, надо строить первообразные кривые для обводов судна.

В главе IX излагаются те способы вычисления остойчивости, где, подобно вычислению положения начального метацентра, надо исчислять моменты инерции площадей ватерлиний.

В главе X изложен способ Гюи и Симар, основанный на возможности разложить в ряды по степеням угла наклонения все элементы статической остойчивости. И для вычисления этих элементов оказывается необходимым провести плоскости, параллельные грузовой ватерлинии не только в подводной части судна, но вплоть по верхнюю палубу, затем надо снимать ординаты всех поперечных сечений при разных шпангоутах и, пользуясь первыми, третьими, пятыми и седьмыми степенями этих ординат, вычисляются искомые элементы; но трудно сказать, ввиду разных допущений, замены производных разных порядков отношением конечных приращений и пр., какова точность полученных результатов.

Наконец, глава XI посвящена описанию особых гидростатических весов Хека, которыми, имея модель судна, можно определить элементы его остойчивости при каком угодно наклонении.

В главе XII даны приемы приближенного вычисления водоизмещения для судна, имеющего небольшой дифферент, когда предварительно построен грузовой размер для прямого положения судна, а также об определении перегиби и исчислении водоизмещения в этом случае.

Вторая часть книги начинается с изложения необходимых понятий из теоретической механики и гидростатики, и даются определения тех поверхностей, которых исследование и составляет предмет геометрии корабля.

Эти поверхности суть следующие:

1) Поверхность центров *(C)*, т. е. геометрическое место центров величины различных объемов заданной величины V_0, которые могут быть отсечены плоскостью от плавающего тела.

2) Катящаяся поверхность *(F)*, т. е. огибающая всех ватерлиний, отсекающих от плавающего тела заданный объем V_0.

3) Поверхность T центров тяжести равнообъемных слоев объема u, заключенных между двумя параллельными ватерлиниями, отсекающими от плавающего тела объемы V_0 и $V_0 + u$.

Геометрия корабля начинается с исследования поверхности центров (C), показав свойства касательных плоскостей к этой поверхности, исследуют кривизну ее около всякой точки. Это исследование приводит к такой теореме: „индикатриса в точке C поверхности центров (C) есть эллипс, подобный эллипсу инерции соответствующей ватерлинии F и при том оси этих эллипсов соответственно параллельны". Эта теорема и составляет главный вывод из исследования поверхности центров; из нее следуют все свойства радиусов кривизны различных сечений этой поверхности, проходящих через точку C. Глава заканчивается определением метацентра. Следующие две главы заключают столь же полное исследование поверхности (F) и поверхности (T), и, наконец, в последней главе XVIII решен ряд задач, где выводы, изложенные в геометрии корабля, прилагаются к частным примерам плавающих тел простой формы.

Приложения геометрии корабля выяснятся в теории остойчивости; в первой же части настоящего тома, половина которой посвящена вычислению перемещений центра величины, для чего и приведено множество способов, ни разу не воспользовались свойствами поверхности центров (C). Мы указывали на длинноту и сложность предложенных приемов вычисления перемещения центра величины, и нам кажется, что было бы необходимо выяснить, какова точность предложенных приемов, в какой зависимости находится погрешность вычисляемых по приближению выражений от числа ординат, какая точность достаточна для целей практики, и, определив сообразно этому лишь действительно необходимое число ординат, можно было бы значительно укоротить все изложенные кораблестроительные вычисления. При этом необходимо иметь в виду и масштаб того чертежа, с которого ординаты снимаются; обыкновенно он таков, что нельзя получить точность более трех знаков, с этим и надо сообразовать число ординат, а не брать их такое множество, которое соответствует точности в пять или шесть знаков.

Theorie du Navire par J. Pollard et A. Dudebout. Tome II. Paris. 1891. 8°. IV + 432.[1]

Этот 2-й том теории корабля заключает в себе два главных отдела: 1) Статика корабля и 2) Качка корабля на тихой воде.

Статика корабля излагается в первых 12 главах этого тома, содержание которых следующее.

Глава XIX. О положениях равновесия плавающего тела. В геометрии корабля были исследованы главные свойства поверхностей: (C) — центров

[1] Рецензия на том II впервые напечатана в „Морском сборнике" (1891, № 12).

величины подводных отсеков данного водоизмещения, (F) — огибающей ватерлиний этих разнообъемных отсеков, и (T) — центров величины равнообъемных слоев. Плавающее тело находится в равновесии, если центр тяжести его и центр величины лежат на одной отвесной прямой; по свойствам поверхностей (C) и (F) это условие равнозначно такому геометрическому:

Нормаль, опущенная из центра тяжести на поверхность (C), должна быть вертикальна. Число всех положений равновесия равно числу нормалей, которые можно провести через центр тяжести этого тела к поверхности (C). Рич доказал, что это число четное.

Глава XX. Рассматривается общий вопрос о том, какие силы надо приложить к плавающему телу, чтобы удерживать его в данном положении, отличном от положения естественного равновесия, не изменяя водоизмещения.

Для задания нового положения плавающего тела надо задать ту ватерлинию, которая в этом положении будет совпадать с горизонтом воды, или, как говорят, задать плоскость плавания. Пересечение этой плоскости с естественной ватерлинией называется *осью наклонения*, плоскость, перпендикулярная к этой оси — *плоскостью наклонения* и угол между данною плоскостью плавания и естественною — *углом наклонения*.

Для удержания плавающего тела в данном наклонном положении надо приложить к нему пару, лежащую в вертикальной плоскости, проходящей через центр тяжести и новое положение центра величины. Эта пара разлагается на три других: $P \cdot \varphi_{0,n}$ и $-Pa \cdot \sin\theta$, лежащие в плоскости наклонения, и $P\eta$ — в плоскости, ей перпендикулярной. Здесь P есть вес тела, а a — расстояние центра тяжести от центра величины в прямом положении, θ — угол наклонения, η и $\varphi_{0,n}$ — проекции перемещения центра величины на ось наклонения и прямую, к ней перпендикулярную, лежащую в данной плоскости плавания. Пары $P \cdot \varphi_{0,n}$ и $P\eta$ называются парами остойчивости формы; $Pa \cdot \sin\theta$ — пара остойчивости веса. Далее исследуется пара остойчивости формы для бесконечно-малых углов наклонения и показывается построение ее плоскости и момента при помощи эллипса инерции естественной ватерлинии [индикатрисса поверхности (C)]. Предполагая затем плоскость наклонения постоянной (для корабля — поперечной) и что в ней вычерчены кривые центров C и ее эволюта D, то для получения плеча остойчивости, соответствующего данному наклонению, стоит только измерить расстояние начального положения центра величины до касательной к кривой D, составляющей с отвесной линией угол, равный углу наклонения; иными словами, для суждения об остойчивости формы надо построить кривую (K), подножную кривой D относительно точки C. Затем составляются формы, по которым, зная уравнение двух из кривых C, D и K, находится уравнение третьей; или же, зная координаты ряда точек двух из этих кривых, можно вычислить координаты точек третьей.

Глава XXI. Разные виды диаграмм остойчивости. Остойчивость судна достаточно вообще исследовать для поперечных наклонений. Мерою остойчивости служит момент восстановляющей пары, зависящий: 1) от плеча ψ остойчивости формы, 2) водоизмещения P и 3) ординаты центра тяжести a. Длина ψ в свою очередь зависит от угла наклонения θ и водоизмещения. Таким образом, восстановляющий момент M есть функция трех переменных независимых: водоизмещения P, наклонения θ и расстояния центра тяжести от начального центра величины a. При этом предполагается еще, что корабль сидит на ровный киль или вообще не изменяет дифферента. Итак, даже в этом случае момент M, как функция трех переменных независимых, не подлежит геометрическому изображению не только на плоскости, но и в пространстве. На плоскости мы можем изображать функции только одной переменной независимой; поэтому при составлении диаграмм остойчивости приходится двум из переменных P, a и θ — дать определенные частные значения и представлять графически зависимость M от третьей, при этих частных значениях первых двух. Обыкновенно задают одно среднее значение переменной a и вычерчивают серию кривых, показывающих зависимость M от θ при разных постоянных значениях P, или наоборот. Зависимость M от θ может быть представлена в координатах прямоугольных или полярных; отсюда разнообразие диаграмм остойчивости, из которых описаны следующие: Бенжамен-Спенса, Макфарлан-Грея, Деймара и метацентрическая. Эта последняя исследована с большою подробностью, указана зависимость вида ее от формы обводов и показано, как при помощи ряда, расположенного по степеням θ, вычислить радиус кривизны эволюты любого порядка от кривой C.

Глава XXII. Влияние перемещения грузов на корабле. В этой главе решаются такие задачи: 1) определить угол и плоскость наклонения корабля от перемещения данного груза по данному направлению на определенную длину, предполагая груз весьма малым относительно водоизмещения; 2) исследовать уменьшение остойчивости при подъеме груза, происходящее как от повышения центра тяжести корабля, так и от подвижности груза, пока он на весу; 3) исследовать влияние на остойчивость подвижного груза, например способного кататься по заданной кривой, и определить меру ее уменьшения; 4) исследовать остойчивость корабля, имеющего резервуары, не вполне заполненные жидкостью; этот вопрос разработан особенно подробно, и указаны предосторожности при приеме и сдаче жидкого груза (например керосина или нефти наливом).

Глава XXIII. Посвящена практическим приложениям общих выводов предыдущей главы, как то: 1) определение из опыта положения центра тяжести корабля. Производство этого опыта описывается со всеми подробностями и приводится форма тех бланков, на которых должны быть занесены как результаты наблюдений, так и все выводы из них; 2) определение величины плеч остойчивости, пользуясь моделью корабля,

нагруженной так, чтобы положение ее центра тяжести соответствовало положению центра тяжести корабля. По свидетельству директора „Forges et Chantiers de la Mediterrannee“ такой способ дает результаты, точные до 4%. При этом описывается и практический прием определения центра тяжести модели.

Глава XXIV. Изменения остойчивости и положений равновесия корабля, происходящие от приема или сдачи некоторого груза. Показав возможность решить этот вопрос в самом общем случае, т. е. когда корабль принял данный груз p в данное место, — правда способом, практически вряд ли выполнимым, — авторы переходят к решению этого вопроса для простейших частных случаев и для грузов малых сравнительно с водоизмещением, вычисляя как положения равновесия, так и изменения остойчивости от принятия небольшого груза, центр тяжести которого находится в диаметральной плоскости корабля, а также и изменения дифферента.

Глава XXV посвящена рассмотрению практических применений выводов предыдущей главы; так, здесь исследуется остойчивость прямоугольной шаланды, наполняемой водой, при разной степени наполнения, и особенно подробно остойчивость плавучих кранов (килекторов).

Глава XXVI. В этой главе составляются общие формулы, показывающие влияние на остойчивость изменения подводных очертаний корабля, происходящего от прикрепления к кораблю посторонних тел заданной формы и веса, и в следующей главе эти общие формулы прилагаются к решению вопросов практических, как то — подробному исследованию остойчивости гидравлического (плавучего) дока, при разных фазах его погружения, при подъеме судна; влияния на остойчивость корабля надельных брусьев, и наконец — рассмотрение остойчивости при затопленных, вследствие пробоины, отделениях. Этот вопрос, по важности своей, заслуживал бы более подробного исследования, нежели у авторов настоящей книги, где указывается только, что если отделение имеет водонепроницаемую палубу ниже горизонта воды, то вопрос сводится к более простому — принять в данное место данный груз; если же отделение сверху открыто, то предлагается или исследовать влияние затопления такого отделения на модели, или же исследовать остойчивость корабля, воображая себе, что как будто у него вырезано затопленное отделение. Нам кажется, что вопрос проще решается по способу последовательных приближений, по крайней мере положение равновесия находится весьма быстро.

Глава XXVIII. Остойчивость судна, стоящего на мели. Положим, что имеется некоторое тело, вес которого P, плавающее на воде, и что дно в этом месте параллельно горизонту воды. Если уровень воды будет понижаться постепенно, то когда глубина будет равна q, тело касается дна; требуется определить положение равновесия тела, когда глубина равна z и заключается между 0 и q. Решение вопроса в такой общей

форме весьма затруднительно, а потому авторы полагают, что плавающее тело есть цилиндр с горизонтальными производящими, и дают графическое решение поставленной задачи. Но и это решение требует массы продолжительных вычислений, и если требуется знать положение равновесия для одной какой-нибудь заданной глубины, то его было бы проще найти путем последовательных приближений, нежели предложенным графическим. Глава оканчивается исследованием остойчивости при данном положении равновесия судна, стоящего на мели.

Глава XXIX. В этой главе исследуется остойчивость судна, опирающегося на киль, например, при постановке на блоки в сухих доках, или при подъеме на Мортонов элинг и пр., и первый вопрос, который разбирается — такой: если судно оперлось килем о блоки, определить, насколько может понизиться уровень воды ранее, нежели судно начнет крениться. Показав затем, как найти положение равновесия при данном углублении и исследовав остойчивость, авторы переходят к весьма подробному и обстоятельному исследованию спуска судов как со стороны статической, так и динамической. В заключение этой главы разобрано килевание судов,

Глава XXX, которою заканчивается статика корабля, трактует о равновесии кессона или водолазного колокола, плавающего на поверхности воды, и общие выводы прилагаются к исследованию остойчивости шаланды, снабженной по бортам воздушными резервуарами, закрытыми сверху и открытыми внизу.

Второй отдел этого тома заключает в себе 10 глав, посвященных рассмотрению вопроса о качаниях судна на тихой воде, сперва не принимая во внимание ее сопротивления, а затем выясняется влияние сопротивления воды на эти качания. Содержание глав следующее:

Глава XXXI. В этой главе выводятся условия устойчивости равновесия плавающего тела. В статике корабля не рассматривается влияние инерции судна на его остойчивость, а разбирается лишь величина тех сил и пар, которые надо приложить к телу, чтобы удерживать его в данном положении. Если плавающее тело вывести из положения естественного равновесия и затем предоставить самому себе, то оно будет стремиться или вернуться в старое положение равновесия, или же переходить в новое; но во всяком случае оно достигает одного из них, обладая некоторою скоростью и в силу инерции переходит за положение, соответствующее равновесию, и совершает около него колебания. Положение равновесия устойчивое, если при сообщении телу бесконечно-малой скорости и отклонения его от этого положения остаются бесконечно-малыми. Для корабля в этой главе доказывается, что, не принимая во внимание сопротивления воды, достаточное условие устойчивости равновесия то, чтобы метацентр для поперечных наклонений был выше центра тяжести.

Глава XXXII посвящена изложению вопроса о динамической остойчивости; выясняется необходимость ее рассмотрения, построение диаграммы и пользование ею при решении разных вопросов, например найти угол

крена от действия пары, момент которой изменяется по известному закону в зависимости от наклонения корабля, и делается сравнение диаграммы опрокинувшегося „Captain“ с диаграммою „Monarch“.

Глава XXXIII излагает учение о малых колебаниях корабля около положения равновесия. Составив общие дифференциальные уравнения для колебаний плавающего тела около положений равновесия, показывают, что для малых колебаний, отбрасывая члены высших порядков, получается система линейных уравнений с постоянными коэффициентами, для интегрирования которых авторы излагают способ Лагранжа и, получив интегралы для самого общего случая, последовательно переходят к частным, т. е. когда тело подобно кораблю имеет одну плоскость симметрии и, наконец, две взаимно перпендикулярных. При этом обращается внимание на то обстоятельство, что когда плавающее тело имеет одну плоскость симметрии, то качания его около горизонтальной оси, лежащей в плоскости симметрии (боковая качка), непременно сопровождаются колебаниями около вертикальной оси; килевая же качка сопровождается вертикальными колебаниями всего корабля.

Глава XXXIV. В этой главе исследуются вообще качания судна на тихой воде, не принимая сопротивления ее, предполагая, что амплитуда этих качаний какая угодно, но что корабль имеет две взаимно перпендикулярные плоскости симметрии. При таком предположении исследование боковой качки сводится к интегрированию уравнения

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + P(h-a)\sin\theta = 0,$$

где θ — угол наклонения, J — момент инерции корабля, P — его вес, $(h-a)\sin\theta$ — плечо статической остойчивости при угле крена θ. Эта последняя величина обыкновенно задается в виде графической кривой, и для этого случая авторы излагают способ Мозлея графического интегрирования написанного выше уравнения. В случае же когда $(h-a)\sin\theta$ дано в виде аналитической функции $F(\theta)$, то это уравнение интегрируется в квадратурах.

Подробному исследованию этого последнего случая посвящается глава XXXV, где предполагается, что $(h-a)\sin\theta$ разложено в ряд по степеням θ; тогда качания корабля представляют аналогию с колебательным движением тяжелой точки по некоторой кривой, расположенной в вертикальной плоскости. Доказав, что из всех кривых только циклоида такова, что период колебаний не зависит от величины их амплитуды, авторы доказывают, что для того, чтобы период боковой качки не зависел от величины ее розмахов, надо, чтобы метацентрическая кривая была развертkою круга, центр которого совпадает с центром тяжести корабля и радиус есть расстояние начального метацентра до центра тяжести.

Глава XXXVI объясняет прием, помощью которого можно исчислить момент инерции корабля; затем излагаются способы определения момента инерции твердого тела из наблюдений его качаний около некоторой

неподвижной оси и из наблюдений качаний этого тела, когда оно неизменно связано с цилиндром, положенным на горизонтальную плоскость, вместе с которыми тело и качается. Последний способ определения момента инерции был применен к пароходу „Elorn“, водоизмещением в 100 т.

Глава XXXVII. Влияние движений корабля на находящиеся на нем грузы. При качке корабля, вследствие того, что всякая материальная точка, с ним связанная, должна двигаться по некоторой определенной траектории и при том известным образом, действие этой точки на связи, например давление на опору, есть равнодействующая веса этой точки и силы инерции переносного ее движения; эта равнодействующая называется *кажущимся весом* этой материальной точки. Предполагая, что корабль качается по тому же закону как сложный маятник, авторы составляют выражения для вычисления величины и направления кажущегося веса всякой точки, а также и графическое построение этого веса, и затем прилагают эти выводы к некоторым примерам, которые показывают, что при расчете разных связей и креплений необходимо принимать во внимание изменения веса вследствие движений корабля; так для оконечностей корабля длиною в 160 м. (525 ф.), как современные океанские пароходы, при размахах килевой качки в 6° с периодом в 8 секунд ускорение кажущегося веса при крайних положениях корабля суть 15 м (49.2 фута) и 4.6 м (15.1 фута) в сек.^{2} вместо истинного в 9.8 м/сек.^{2} (32.15 фута).

Остальные четыре главы этого тома заключают в себе рассмотрение вопроса о качаниях корабля на тихой воде, принимая в расчет ее сопротивление. Начав с вывода условия устойчивости равновесия тела, плавающего в сопротивляющейся жидкости, авторы исследуют качку кругового цилиндра, принимая сопротивление пропорциональным 2-й степени скорости. Получаемое в этом случае дифференциальное уравнение интегрируется в квадратурах, но эти квадратуры не выражаются в конечном виде, почему для небольших колебаний авторы дают еще приближенное решение этого вопроса.

Переходя затем к случаю действительного корабля, авторы предполагают сперва, что сопротивление воды качаниям судна может быть выражено тремя членами, из которых первый пропорционален угловому ускорению, второй — первой степени угловой скорости, а третий — второй степени угловой скорости, и что ось качаний занимает в корабле постоянное положение, вообще не проходящее через центр тяжести корабля.

Затем они подробно исследуют влияние каждого из членов в формуле, выражающей сопротивление, на характер качаний, и показывают, как по наблюдению убывания амплитуды качаний возможно вычислить коэффициенты, стоящие в формуле сопротивления при $\frac{d^2\theta}{dt^2}$, $\frac{d\theta}{dt}$ и $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$. Но, ввиду малочисленности данных и наблюдений подобного рода, не приводят ни одного примера такого вычисления, так что на эту теорию надо

смотреть, как на подготовительную, которая должна служить лишь путеводною нитью при анализе таких наблюдений, если их накопится достаточное число и достаточно точных. Затем излагаются опыты Фруда и опыты с „Elorn“ и определение из этих опытов кривых погашения амплитуды розмахов, влияние на быстроту этого погашения боковых килей и наполненных водою отделений, и описываются регистрирующие качку приборы Фруда и Бертэна и подробно разбирается, как должно анализировать записи, получаемые этими приборами.

Этот перечень содержания второго тома сочинения гг. Поллар и Дюдебу в достаточной мере показывает, с какою подробностью они излагают свой предмет; при этом они не довольствуются сводкою известных уже ранее теорий и результатов, а излагают эти теории с самостоятельной общей точки зрения и стараются развить эти теории насколько то допускает состояние математического анализа. В этом отношении особенно замечательна глава XXXV, где находится условие независимости периода качаний от их амплитуды (таутохронизм качаний). Когда аналитическое решение вопроса слишком сложно, авторы пользуются графическими приемами решения, и они сумели придать этим приемам такую общность, что этот способ не уступает анализу, давая вместе с этим более наглядные результаты. Содержание вышедших двух томов, в особенности второго, „Теории корабля“ гг. Полляра и Дюдебу показывает, какой капитальный вклад в литературу этого предмета составит их сочинение, — оно смело может заменить целую библиотеку.

Theorie du Navire par j. Pollard et A. Dudebout. Tome III. Paris. 1892. 514 стр.[1]

Третий том „Теории корабля“ гг. Поляра и Дюдебу посвящен изложению динамики корабля, именно качки на взволнованном море, и сопротивлению воды поступательному движению корабля.

После краткого изложения оснований гидростатики, авторы выводят эйлеровы уравнения движения совершенной жидкости, т. е. те уравнения, которыми определяется движение всякой частицы жидкости по ее траектории, и получают из них следующие общие следствия: во всякий момент в движущейся жидкости есть система поверхностей уровня, давление в этот момент во всех точках каждой из этих поверхностей одно и то же. Нормаль в каждой точке поверхности такого динамического уровня направлена по равнодействующей внешних сил, действующих на соответствующую частицу жидкости, и ее силы инерции в этот момент.

Указав затем важнейшие свойства движения жидкости, когда существует потенциал скоростей, выводят теорему Бернулли для установив-

[1] Публикуется впервые.

шегося движения, и для примера прилагают общие уравнения к движению жидкости под действием силы тяжести, после чего переходят к исследованию равновесия и движения жидкостей несовершенных, каковы все жидкости в природе, т. е. обладающих вязкостью, так что при движении их надо принимать в расчет внутреннее трение.

В следующих за этою вступительною трех главах излагается с особенною обстоятельностью теория волн. Так как в этой теории большую роль играют так называемые *трохоиды*, т. е. кривые, описываемые какою-нибудь точкою, лежащею в плоскости круга, когда его окружность катится по некоторой прямой, то авторы подробно разбирают геометрические свойства таких кривых. Переходя затем к теории установившегося волнения или зыби, авторы придерживаются такого метода: положив, что каждая частица жидкости движется равномерно по окружности, плоскость которой вертикальна, делая полный оборот в промежуток времени, равный периоду волны, что частицы, находящиеся одновременно на поверхности, находятся в разных фазах на своих орбитах, что все частицы, бывшие вначале на той же отвесной линии, находятся постоянно в одинаковых фазах, ... показывают, что такое движение совершенной жидкости возможно под действием силы тяжести, и тогда оказывается, что свободная поверхность жидкости будет представлять во всякий момент систему параллельных цилиндров, прямое сечение которых есть трохоида, перемещающихся поступательно и равномерно. Вместе с тем оказывается, что при таком движении свободная поверхность во всякий момент есть поверхность динамического уровня, точно также и все прочие поверхности уровня во всякий момент суть трохоидальные цилиндры; из условия же, что на бесконечно-большой глубине жидкость находится в покое, следует закон уменьшения радиуса орбит с углублением. Замечено, что скорость волн, когда на них действует ветер, больше нежели теоретическая, соответствующая их длине; эта разность приписывается поверхностному течению, которое образуется от давления ветра на обращенный к нему склон волн. Скорость этого течения может достигать значительной величины и отзываться большою ошибкою в счислении, так что крушение фрегата „Александр Невский“ приписывали этому явлению; авторы и исследуют волны, сопровождаемые течением; затем переходят к волнению неправильному, когда две попутных системы волн, так сказать, налагаются друг на друга. Этот вопрос решается лишь приближенно, точно так же, как вопрос о толчее, причем все эти вопросы трактуются по тому же методу, как и теория установившегося волнения, т. е. сперва пишутся конечные уравнения движения частицы, и затем проверяется, что такое движение возможно в совершенной жидкости, в точности или с известным приближением. После этой аналитической теории волн следует теория геометрическая, т. е. все выводы, полученные ранее, получаются геометрическим путем, исходя из тех же основных положений, затем рассматривается влияние глубины моря на волнение и выводится зависимость

между длиною волны, скоростью ее распространения и глубиною моря, способы наблюдения элементов волны и сводка наблюдений лейтенанта Пари над волнами и, наконец, несколько замечаний о приливных волнах, их размерах и скоростью распространения.

В этом же отделе рассматривается качка корабля на волнении, не принимая во внимание сопротивления воды, и выводятся известные формулы Фруда, связывающие величины розмахов корабля, периоды его, периоды волны и наибольший угол ее наклонения, затем все результаты, получаемые аналитически, снова находятся изящным геометрическим путем, указанным Марбеком. При составлении уравнений движения корабля приходится делать разные предположения, упрощающие вопрос, например, что размеры корабля бесконечно малы относительно размеров волны; поэтому Фруд и Бертэн задались такими вопросами — определить элементы такого волнения, на котором бесконечно-малый поплавок качался бы точно так же, как корабль на заданном; авторы и излагают способ Бертэна, который вычисляет три коэффициента приведения, зависящие от размеров корабля и положения его центра величины и размеров волны.

Следующий отдел посвящен изложению теории качки корабля на волнении, принимая в расчет сопротивление воды. Изложив приближенное аналитическое решение этого вопроса, данное Боссю, авторы подробно рассматривают исследования Фруда и результаты его опытов на „Inflexible“ „Devastation“, а также исследования Бертэна над транспортом „Annamite“ подтверждающие согласие приближенных выводов современной теории с действительностью.

На французских броненосных эскадрах 1863, 1873 и 1879 гг. были произведены сравнительные испытания мореходных качеств кораблей разных типов; авторы посвящают отдельную главу этим испытаниям Эскадра 1863 г. состояла из броненосных фрегатов: „Normandie“ с периодом естественных качаний в 4.79 сек., „Invixible“ — 4.87 сек., „Couronne“ — 4.94 сек, „Magenta“ — 5.78 сек., „Solferino“ — 6.04 сек., а также винтовых кораблей „Tourville“ — 5.51 сек. и „Napoléon“ — 5.82 сек. Каждодневно тщательно замечалась амплитуда размахов качки на каждом из судов, и с ясностью оказалось преимущество больших периодов, так что нашли нужным изменить расположение грузов на „Normandie“ и тем увеличить его период до 5.4 сек. Подобные же результаты были получены в Англии, в особенности же во время крейсерства броненосца „Océan“ в 1872 г. Период его 9.93 сек. и метацентрическая высота всего 0.58 м, и при переходе из Шербурга в Оран оказалось, что в то время, как броненосные корветы „Armide“, „Phetio“, „Rein-Blanche“ с периодами 5.70, 5.18 и 6.02 сек. имели розмахи до 30—40° на сторону, „Océan“ почти не качался, и розмахи его не превышали 3—4°. Подтвердив этими примерами выводы теории, авторы разбирают влияние периода качки и коэффициента погашения на качества корабля на волнении, причем под качествами разумеют: 1) плавность качки, противополагая ее стремительности, которая

характеризуется величиною вызываемых ею сил инерции, которые обратно пропорциональны квадратам периодов естественных качаний, 2) средняя величина розмахов при обычных условиях плавания, 3) наибольший розмах, который может быть в случае равенства периодов качания и волн. В заключение этой главы приведена таблица элементов качаний разных судов французского флота и вычисленных для них коэффициентов приведения, разобрана вкратце килевая качка и обращено внимание на изменение поперечной остойчивости судов, уходящих от волны или идущи в разрез волн, достигающее на миноносцах значительной величины.

Вторая половина разбираемого тома трактует о сопротивлении воды поступательному движению корабля.

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР

*

Технический редактор *А. В. Смирнова*
Корректоры *Н. А. Малевич*
и *Л. С. Халиманович*

*

РИСО АН СССР № 3657. Подпис но
к печати 4/XI 1949 г. М-33455
Печ. л. 19³/₄.+1 вкл. Уч.-изд. л. 20,6
Тираж 3000. Зак. № 1411

*

1-я тип. Издательства Академии Наук СССР.
Ленинград, В. О., 9 линия, 12.

ОПЕЧАТКИ

Страница	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
65	1 св.	разнообъемных	равнообъемных
100	Заголовок таблицы	$\log\frac{7}{3}\frac{1}{2TS}=5{,}9772$	$\log\frac{7}{3}\frac{1}{2TS}=\bar{5}{,}9772$
101	Нижняя табл., заголовок III столбца	$2R_i-2\rho_i+l_i$	$R_i-2\rho_i+l_i$
122	4 сн.	9.81 м в секунду	9.81 м/сек.^{2}
212	10 св.	$\sigma=\sqrt{6\cdot\frac{n-b}{b-\lambda}}$	$\sigma=\sqrt{\frac{6(\lambda-b)}{b^3}}$