

**А.Н. Крылов**

**Избранные труды**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 656  
ББК 39.1  
А11

**А.Н. Крылов**

А11 Избранные труды / А.Н. Крылов – М.: Книга по Требованию, 2017. – 808 с.

**ISBN 978-5-458-32895-1**

В книгу вошли такие работы Алексея Николаевича Крылова, как "Общая теория качки корабля на волнении", "Определение положения равновесия корабля, имеющего пробоину", "Возмущения показаний компаса, происходящие от качки корабля на волнении", "О теории гирокомпаса Аншютца, изложенной проф. Геккелером", "О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем", "О вынужденных колебаниях упругих призматических стержней", "Некоторые замечания о крешерах и индикаторах" и другие.

**ISBN 978-5-458-32895-1**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2017

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2017

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

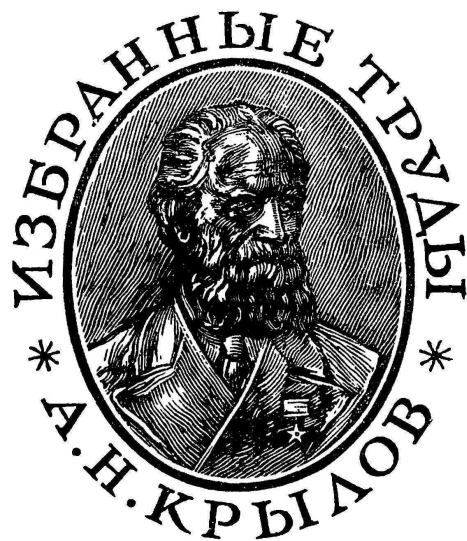
Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)







---

## ОБЩАЯ ТЕОРИЯ КАЧКИ КОРАБЛЯ НА ВОЛНЕНИИ

Настоящий доклад делится на две части: собственно доклад и „Прибавление“ к нему. Отношение их таково: в первой части перечисляются полученные результаты, а в „Прибавлении“ они действительно выводятся математически, и объясняются применяемые для того способы.

Почти невозможно иначе начать рассмотрение качки корабля, как с имени покойного Фруда, классическое сочинение которого „О боковой качке корабля“ составляет краеугольный камень всякого исследования по этому предмету. В этом сочинении Фруд ставит вопрос в следующей общей форме: „Каково совокупное действие непрерывного ряда последовательных волн на корабль?“. Затем он продолжает: „Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо прежде всего определить, как каждая отдельная волна действует на корабль в каждый момент времени. Какое положение стремится корабль принять во всякий момент по отношению к волне, на которой он плавает, и чем измеряется та сила, которая заставляет корабль принимать это положение; или, точнее говоря, каково *положение мгновенного равновесия плавающего на волне тела* и каковы движущие силы, которые действуют на тело, когда оно отклонено от скаванного положения равновесия?“.

Рассматривая ватем простейший случай этого общего вопроса, Фруд дал приближенное решение его. Этот случай есть случай чисто боковой качки при допущении, что размеры корабля очень малы по сравнению с размерами волны, профиль которой предполагается синусоидальным. Устанавливая это последнее предполо-

жение, Фруд, высказав, что профиль волны в действительности трохоидаальный, прибавляет: „Я не был в состоянии преодолеть математические трудности, которые встречаются при таком предположении; но я не оставляю надежды на возможность успеха в такой попытке“.

Математические трудности, на которые он намекал, заключались в неимении такого решения уравнений гидродинамики, которое соответствовало бы волновому движению, и, следовательно, в неизвестности действительного динамического строения волны. Хотя теория Герстнера трохоидаальных волн существовала уже с 1802 г., но она была так основательно забыта, что нужен был гений Ранкина, чтобы вторично открыть ее в 1863 г.

Впоследствии Фруд занимался другими работами, более важными, чем устанавливать подробности теории качки корабля, и вышеупомянутых попыток в этом направлении не делал. Почти в то же самое время Э. Бертен во Франции начал ряд своих исследований по этому вопросу, и, чтобы привлечь внимание к размерам корабля, он ввел несколько коэффициентов приведения, назначение которых „не в том, чтобы получить более точное уравнение боковой качки, но в том, чтобы вычислить такой волновой склон, который производил бы на корабль бесконечно малых размеров такое же действие, как и действительная волна на рассматриваемый корабль конечных размеров“.

В 1871 г. Сен-Венан, знаменитый по своим изысканиям в области теории упругости, разобрал тот же вопрос, равнив способ Бертена: он принимал волну трохоидаальною; но его метод хорош тогда, когда ширина корабля мала сравнительно с длиной волны, но этот метод потребовал бы весьма длинных численных вычислений, если бы его применить для случая качки при косвенном курсе.

Фруд в своей записке дал приближенный метод расчета действующего волнового склона в этом последнем случае; но здесь его предположения носят настолько произвольный характер, что невозможно судить о степени приближения. В самом деле, при составлении основных уравнений боковой качки было показано, что положение мгновенного равновесия корабля во всякий момент



есть то, при котором его мачты перпендикулярны поверхности волны; здесь это предположение не имеет места, потому что неизвестно, в какой точке волны брать нормаль, так как корабль может занимать целую длину волны или даже более, вместе с тем переносное движение корабля (поступательное движение центра тяжести) принимается как бы неизменявшимся, килевая качка вовсе не рассматривается.

Исследование переносного движения и килевой качки корабля на море важно не только для суждения о мореходных его качествах, но главным образом для того, чтобы получать действительные положения, принимаемые кораблем на волнении, для расчета тех напряжений, которым корабль подвергается. Сэр Э. Рид в его труде вполне сознавал необходимость этого, и я надеюсь, что сэр Эдуард не откажет мне в позволении выписать следующие строки из его труда, где необходимость вышеупомянутого исследования выражена очень красноречивым и ясным образом и, таким образом, представляет наилучшее введение в мою работу, какое только я могу желать.

„В попытках приближенно определить срывающие и изгибающие усилия, действующие на корабль на море, мы встречаемся с большими трудностями; и вопрос этот при настоящем состоянии знаний не допускает полного и точного решения: в самом деле, можно даже выразить сомнение в том, что весьма разнообразные и постоянно изменяющиеся усилия, действующие на корабль на волнении, когда-либо будут полностью выражены математическим языком и рассчитаны с тою же степенью точности, как уже изученные усилия, действующие на тихой воде. Есть, однако, возможность расчлнить главнейшие причины напряжений и во многих случаях указать приближенно предельные их значения, как это сделано ниже.

„Что же касается динамической части вопроса, хотя она и самая важная, но в настоящее время ее решение выше наших сил, в особенности в том, что касается количественной оценки. Что это именно так, будет очевидно, если бросить самый беглый взгляд на те условия, в которых находится корабль на волнении. Если

пренебречь для простоты боковую качку и предположить, что корабль идет как рав в разрез волн, то прохождение каждой волны по его длине вызывает или стремится вызвать вертикальное поступательное перемещение корабля как твердого тела (исключая особые условия) и вращательное движение, или килевую качку, около его поперечной оси, производя вместе с тем и беспрестанные перемены в относительном распределении плавучести и веса.

„Характер вертикального движения корабля и килевой качки может быть указан в общих чертах; но выразить точно скорость этого движения и соответственные ускоряющие силы, а также исчислить напряжения, происходящие от беспрестанных ударов волн, я не имел смелости даже и попытаться. Даже если бы это и могло быть сделано, остается еще необходимость рассмотреть переносное или вертикальное движение корабля и постоянную изменяемость сил поддержания; то и другое вызывает значительные напряжения; вдобавок к этому надо еще считаться с действием последовательных волн (далеко не однообразных по размерам и периоду), а также и с влиянием собственного хода корабля. Таким образом, мы имеем перед собою весьма сложный вопрос, которого можно только коснуться приближенными методами, о которых я и буду говорить“.

Изложив хорошо известный метод, сэр Э. Рид прибавляет:

„Я привел все эти числовые данные только как указание на то, какую изменяемость можно ожидать в напряжениях корабля на волнении; по всей вероятности, они далеко ниже истинных, так как уже указано, что не принята в расчет килевая качка корабля, которая может вызывать в корабле еще более быстрые и резкие перемены в напряжениях.

„Довольно уже сказано, однако, чтобы показать важность этого предмета, и я только прибавлю, что весьма наглядное представление о тех действиях, которые я пытался описать, получается, если предположить, что корабль неподвижен, а по нему, если можно так выразиться, катится «волна напряжений». Такое представление поможет нам более ясно понять, каким образом изменяемость напряжений влияет на связи корпуса, ибо известно, что

небольшое напряжение (рассматриваемое статически), которое сравнительно слабо влияет на сооружение, пока оно действует в одном и том же направлении, достаточно, чтобы разрушить и более крепкое сооружение, если направление усилия постоянно и быстро изменяется“.

Из этих слов сэра Э. Рида видно, что первое, что нам необходимо для дальнейшего приближения в исчислении напряжений, это получить полное исследование движения корабля на волнении, и поэтому мой доклад и заключает решение следующего вопроса: *определить общее движение корабля, идущего с данною скоростью по системе правильных волн, причем курс его составляет заданный угол с гребнями волн.*

Я хотел сделать из этого доклада не аналитическое упражнение, а естественное дополнение к фрудовской теории боковой качки и дать полные и точные ответы на все пожелания, содержащиеся в приведенной выписке из труда Э. Рида о напряжениях, а также изложить строгий математический метод решения вопросов, указанных вышеназванными авторитетами.

**§ 1.** Колебательное движение корабля на взволнованном море, когда его курс составляет угол  $\alpha$  с направлением бега волн, состоит из общего переносного движения всего корабля и вращательного движения, которое, будучи разложено на три его составляющие, дает: 1) боковую качку, 2) килевую качку и 3) рыскание.

В „Прибавлении“ полностью выяснен способ исследования этих движений аналитически и показан способ их численного расчета для каждого данного корабля при всяком курсовом угле  $\alpha$  для данной системы волн; здесь я представляю вкратце полученные результаты.

Переносное движение определено, когда известно движение центра тяжести корабля; поэтому достаточно знать путь, описываемый этою точкою и закон ее движения по этому пути.

Оказывается, что когда корабль не имеет хода, то его центр тяжести описывает эллипс простым гармоническим движением; этот эллипс расположен в вертикальной плоскости, которая пер-

пендикулярна к гребням волн, т. е. лежит в плоскости орбит частиц воды, иначе в плоскости бега волн.

На фиг. 1 эти пути представлены для равных значений курсового угла  $\alpha$ . Когда курсовой угол  $\alpha = 90^\circ$ , то эллипс приближается почти к кругу, описываемому частицами воды; если же принять, что поперечные размеры корабля очень малы по сравнению с размерами волны, то этот эллипс совпадает с орбитами частицы воды, и мы приходим здесь к выводам Фруда, которые, таким образом, являются простым следствием нашей общей теории, а не независимыми гипотезами.

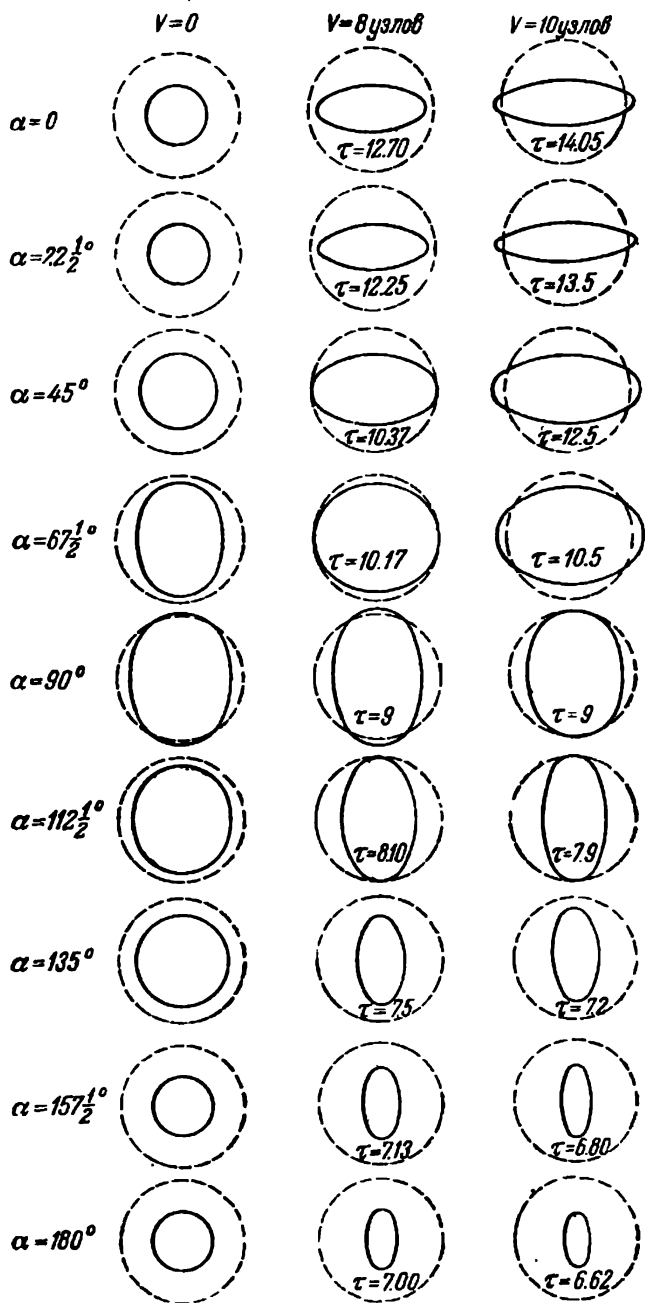
Если корабль имеет ход, то его центр тяжести описывает в пространстве спиралеобразную линию, шаг которой равен длине пути, проходимого кораблем в продолжение полного орбитального обращения его центра тяжести. Вместо того чтобы представлять эти спирали, я вычертил их основания, т. е. путь, описываемый центром тяжести на вертикальной плоскости, перпендикулярной гребням волн и двигающейся с тою же скоростью, с какою идет корабль. Фиг. 1 ясно показывает разницу в движении центра тяжести корабля при равных скоростях (0 узлов, 8 узлов и 10 узлов). Можно заметить, что в двух последних случаях период обращения равен кажущемуся периоду волны и изменяется в зависимости от курсового угла  $\alpha$  и скорости хода корабля; относительный период показан на чертеже, а таблицы в § 15 дают те численные величины элементов, которые послужили для составления этой диаграммы.

Корабль, для которого сделаны все расчеты, был крейсер русского флота „Адмирал Корнилов“, *размерения* которого суть:

Длина . . . . .	350 ф. = 107 м
Ширина . . . . .	48 ф. 6 дм. = 14.8 м
Углубление . . . . .	19 ф. = 5.9 м
Водоизмещение . . . . .	5000 т

*и элементы волны:*

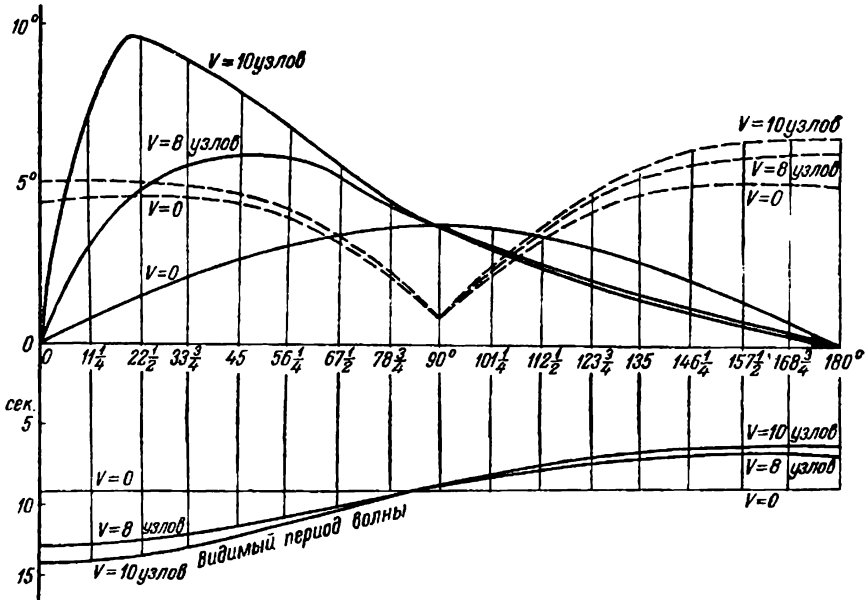
Длина . . . . .	420 ф. = 125 м
Высота . . . . .	16 ф. 6 дм. = 5 м
Период . . . . .	9 сек.



Фиг. 1.

§ 2. Вращательное движение корабля рассматривается как состоящее из трех составляющих: килевой качки, рыскания и боковой качки.

Первые две составляющие, ввиду большого сопротивления воды, состоят только из „вынужденных“ колебаний, амплитуды которых,



Фиг. 2.

как было указано мною в моей первой записке (1896 г.), почти не зависят от величины сопротивления воды. Это обстоятельство весьма благоприятно, потому что благодаря ему мы в состоянии рассчитать с большою степенью приближения килевую качку, несмотря на весьма несовершенное знание сопротивления воды, а именно килевая качка и играет весьма важную роль в расчетах напряжений.

Так как диаграммы позволяют с первого взгляда усматривать главные особенности явления, то на фиг. 2 представлены значения.