

УДК 534. 01 (09)

Ларин А. А.

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КОРАБЛЕСТРОЕНИИ

Несмотря на определенные успехи теории колебаний, в частности, создание спектральной теории линейных колебаний, изучению механических колебаний в технике в XIX веке не придавалось значения, и расчеты на прочность велись в статической постановке. Это объясняется тем, что машины того времени были еще тихоходными и маломощными, и в эпоху становления техники человечество почти не сталкивалось с явлением резонанса.

Резонанс проявляется чаще в тех сооружениях, где рассеяние энергии мало, например, в подвесных мостах. Известны случаи разрушения таких мостов от марширующих по ним солдат [1]. Кроме того, в середине XIX века возникла задача о колебаниях железнодорожных мостов под действием подвижной нагрузки. В 1847 г. в Англии рухнул Честерский мост от проходящего по нему с большой скоростью поезда [2, с. 308]. Катастрофа, сопровождавшаяся человеческими жертвами, вызвала большую тревогу среди инженеров-строителей. И, если проблема разрушения подвесных мостов от проходящих солдат решалась простым запретом идти «в ногу», то железнодорожные мосты требовали проведения серьезных исследований. На протяжении нескольких десятилетий лучшие ученые-механики, среди которых Дж. Стокс, О. Мор, Ф. Виллис, Ж. В. Буссинеск, А. Н. Крылов и др. изучали действие подвижной нагрузки на мосты [2, с. 309–314]. Подробно история развития решения данной задачи приведена в работе С. П. Тимошенко [3, с. 172–179].

Однако, по большому счету, теория механических колебаний долгое время оставалась невостребованной в технике. И первой отраслью, в которой она нашла более широкое применение, стало кораблестроение — самая передовая отрасль техники в XIX веке. В данной статье приводятся первые успешные применения прикладной теории механических колебаний в области кораблестроения.

На развитие военно-морского флота огромное влияние оказала Крымская война 1853–1857 гг. После нее парусные корабли, не имевшие машин, были исключены из списков военных флотов. В 1859 г. во Франции был введен в строй первый броненосный корабль «Ла Глюар» («*La Gloire*») водоизмещением 5600 т, вооруженный 30162-мм гладкоствольными орудиями, располагавшимися в забронированной батарее. На самом деле это был не новый корабль,

а переделанный по проекту инженера Дюпюи де Лома винтовой линейный корабль типа «Наполеон», на котором была срезана одна палуба для компенсации веса брони. Первым броненосцем, построенным из железа, стал английский «Уорриор» (1860 г.). Применение для конструкции корпуса железа позволило увеличить длину корпуса корабля до 116 м, вследствие чего водоизмещение выросло до 9360 т. «Уорриор» был вооружен 38 68-фунтовыми (203 мм) орудиями, располагавшимися в каземате, защищенном 112-мм броней. Схема бронирования «Уорриора» и его орудия представлены на *рис. 1*. Отсутствие брони в оконечностях корабля компенсировалось установкой водонепроницаемых переборок. В настоящее время первый в мире броненосец сохраняется в качестве плавучего музея.

Появление броненосцев свело на нет все военные флоты мира, что и послужило причиной спешного строительства новых кораблей. С 1864 г. вместо гладкоствольных орудий вводятся нарезные. Если для прикрытия корабля от огня гладкоствольных орудий было достаточно тонкой железной брони, появление нарезных орудий заставило увеличивать ее толщину. Это, в свою очередь, привело к повышению калибра орудий. Первые нарезные пушки имели калибр 203 мм, весили 7 т, а масса снаряда составляла 68 кг. Совершенствование броневой защиты вынудило увеличивать калибр орудий, в результате чего вместо многочисленной артиллерии корабли стали вооружать несколькими орудиями крупного калибра, располагавшимися в барбетных или башенных установках. Уже в 1873 г. английская фирма Армстронг построила 406-мм орудия. Четырьмя такими орудиями (в двух башнях) был вооружен английский броненосец «Инфлексибль», вступивший в строй в 1878 г. [4, с. 125].

Еще более мощные 450-мм орудия массой 100 т были изготовлены английской фирмой «Элвик» для итальянских броненосцев «Дуилио» и «Дандоло» водоизмещением 12 тыс. т, вступивших в строй также в 1878 г. На *рис. 2* показан процесс заряжания орудий броненосца «Дуилио». В результате соревнования между броней и артиллерией не только вырос калибр орудий, но и толщина брони достигла 600 мм. Пушки «Уорриора» располагались еще на колесных лафетах и стреляли почти горизонтально, а энергия выстрела погасалась просто откатом орудия по палубе (*см. рис. 1*). Для дальнобойных нарезных орудий были созданы поворачивающиеся на платформе лафеты, а для погашения сильнейшей отдачи стали использовать гидротормоза. Дульная энергия башенных орудий броненосцев «Инфлексибль» и «Дуилио» превышает энергию старых гладкоствольных орудий в 60 раз.

В 1864 г. французский артиллерист Пьер Мартен разработал способ получения литой стали в плазменной регенеративной печи. Полученные в мартеновских печах болванки прокатывались затем в листы и профильные полосы. Этот способ обеспечил верфи недорогим строительным материалом, более прочным, чем железо. С переходом на железные, а затем и на стальные суда с паровыми машинами и винтовыми двигателями кораблестроение начало бурно развиваться. За каких-нибудь два-три десятка лет в военном флоте произошел переход от парусных деревянных кораблей, водоизмещение которых не

превышало 5000 т к стальным гигантам, водоизмещением 15 тыс. т. Для управления движением и вооружением этих кораблей использовалось множество механизмов. То же явление наблюдалось и в коммерческом судостроении. Так, уже в 1858 г. в Англии был построен гигантский пароход «Грейт Истерн» водоизмещением 32 700 т и длиной 210, 4 м. Пароход предназначался для грузопассажирских перевозок и наряду с двумя паровыми машинами, одна из которых работала на винт, а вторая приводила в движение гребные колеса, имел еще и шесть мачт с парусами. Правда, эксплуатация этого гиганта оказалась экономически невыгодной, и его использовали для прокладки трансатлантического кабеля, а в 1890 г. разобрали на металлолом [5, с. 44].

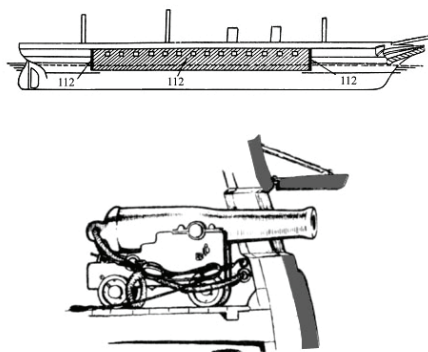


Рис. 1

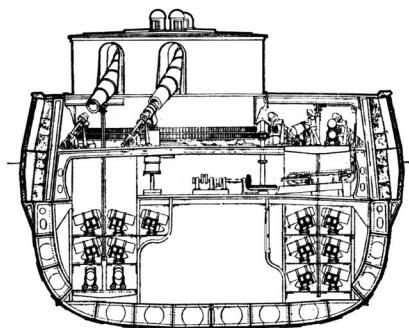


Рис. 2

В результате из мастерства деревянной архитектуры кораблестроение превратилось в наиболее развитую отрасль промышленности, использующую самые разнообразные специальности. Строительство гигантских бронированных кораблей потребовало разработки теоретических основ строительной механики корабля, а также изучения законов остойчивости и качки. Развернувшаяся гонка вооружений заставила использовать при строительстве военных кораблей новейшие достижения не только промышленности, но и науки. В отличие от предыдущих лет, когда тип корабля не претерпевал существенных изменений на протяжении столетий, во второй половине XIX и начале XX веков корабль зачастую успевал устаревать еще до спуска на воду.

Начало исследования качки и остойчивости корабля положено еще Л. Эйлером в работе «*Scientia Navalis*» («Корабельная наука»), которая была издана в Петербурге в 1743 г. [1, с.42]. В этом сочинении Эйлера заложены основы теории статической устойчивости и теории колебаний. Еще через 20 лет исследования Эйлера привели к конкретным рекомендациям для кораблестроителей, изложенным в книге [6].

На протяжении ста лет ученые разных стран продолжали исследования качки корабля. В 1869 г. главный кораблестроитель Британского флота Э. Рид ввел в практику судостроения диаграммы остойчивости, а английский ученый

В. Фруд в 1870 г. разработал теорию боковой качки корабля, поперечные размеры которого предполагались малыми по сравнению с размерами прямого сечения волны. Модель такой качки представлена на *рис. 3*. В 1895 г. А. Н. Крылов разработал теорию килевой качки корабля. После выступления на ежегодном заседании английского общества корабельных инженеров (*Institution of Naval Architects* — *INA*) А. Н. Крылов рассмотрел также и общий вопрос о качке корабля при косвенном курсе относительно гребней волн. В 1898 г. за доклад «Общая теория колебаний корабля на волнении» он был удостоен редкого отличия — золотой медали *INA* [7, с. 109].

Переход на новые строительные материалы, сопровождавшийся облегчением судовых конструкций, поставил перед судостроителями целый ряд новых проблем, в том числе и динамических, и потребовал проведения новых типов расчета, таких как исследование концентрации напряжений, колебания судовых корпусов и др. Основы строительной механики корабля заложил еще Л. Эйлер, который в 1770 г. получил премию Парижской Академии наук за мемуар «Исследование усилий, которые должны выносить все части корабля во время боковой и килевой качки» [6]. Им были разработаны правила нагрузки корабля, правила устройства связей и выработана рациональная система конструкции деревянных судов. Спустя 100 лет, в 1870 г. этот мемуар послужил главному кораблестроителю Британского флота Эдуарду Риду в разработке правил постройки железных судов [7, с. 555].

Особые сложности возникли, когда размеры судна совпали с длиной океанской волны (свыше 130 м). Тогда корабль оказывается между гребнями двух волн (*рис. 4, а*) или повисает на гребне одной волны посередине (*рис. 4, б*). Первыми с этой проблемой столкнулись английские кораблестроители, и суда, у которых длина корпуса соизмерима с длиной волны, называются судами Рида. К тому же коррозионное воздействие морской воды может существенно снизить предел выносливости при циклических нагрузках [8, с. 83]. Ситуация, когда судно ломается в средней части, не выдержав нагрузки, довольно распространенный вид аварии.

Российские кораблестроители также столкнулись с проблемой продольной прочности кораблей при строительстве серии броненосных крейсеров, предназначенных для Тихого океана. По сравнению с крейсерами предыдущих типов новые корабли должны были иметь значительно большую скорость и дальность плавания. В связи с этим выросли их водоизмещение и длина корпуса. На *рис. 4* представлен «Рюрик» — первый корабль из серии, вступивший в строй в 1892 г. Длина его корпуса составляла 132,6 м, а водоизмещение 11 650 т. Две паровых машины общей мощностью 13 250 л. с. позволяли крейсеру развивать скорость около 19 узлов, а для большей автономности плавания он сохранял еще полное парусное вооружение.

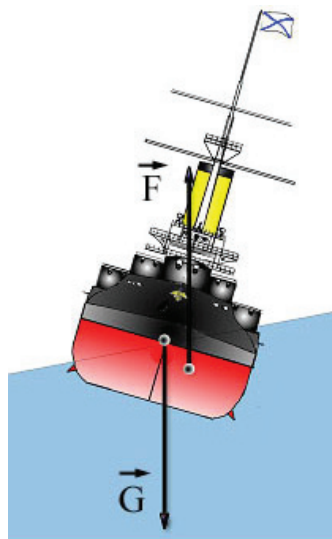


Рис. 3

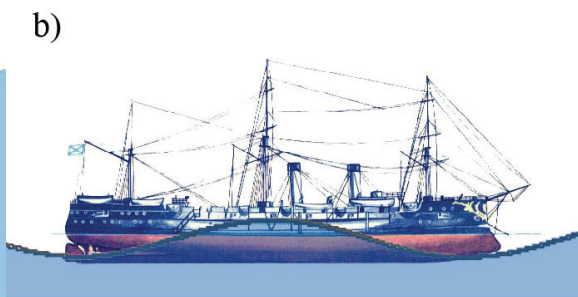
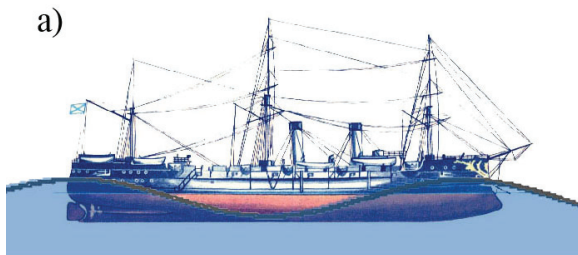


Рис. 4

В военном кораблестроении потребности в динамических расчетах были еще выше, так как корпуса военных кораблей легче коммерческих, а машины у них более быстроходные. Кроме того, они должны рассчитываться на такие нагрузки как выстрелы из своих орудий, попадание вражеских снарядов и даже гидравлический удар при подводных взрывах.

Если первоначально паровая машина воспринималась моряками как вспомогательный двигатель, то со временем на военных кораблях от парусов вовсе отказались, сосредоточив усилия на совершенствовании машин, мощность которых в считанные годы выросла в десятки раз. Увеличение мощности и скорости паровых машин при одновременном облегчении конструкции корпуса породило проблему колебаний последнего. Решение этой задачи сыграло большую роль в развитии теории колебаний континуальных систем, однако это тема отдельного исследования.

Еще одна проблема — крутильные колебания валов паровых машин также возникла впервые в судостроении. Дело в том, что пароходные паровые машины зачастую более мощные, чем стационарные, но при этом имеют меньший вес. Именно многочисленные аварии пароходных валов, происходившие от наступления резонанса или усталостного разрушения при колебаниях, заставили инженеров обратить внимание на вибрационные процессы. Большой вклад в применение теории колебаний в практике кораблестроения сделал видный немецкий инженер Герман Фрам. Его работа, посвященная проблемам колебаний пароходных валов, вышедшая в 1902 г., положила основу обширной теме исследования крутильных колебаний валопроводов [3, с. 24]. Подробнее этот вопрос изложен в статье [9].

Он также в 1909 г. первым применил антивибратор для гашения колебаний корпуса судна [10, с. 122–126]. На корме судна, где наблюдались наиболее интенсивные колебания, был поставлен прибор, подобный паллографу и снабженный катарактом (демпфером) (см. рис. 5). Антивибратор настраивается таким образом, чтобы его собственная частота совпала с частотой вынужденных колебаний корабля. В результате колебания палубы успокаиваются, а энергия благодаря катаракту рассеивается, превращаясь в теплоту. Фрам также создал тахометр для измерений частоты колебаний резонансным методом (рис. 6) [11, с. 59–60].

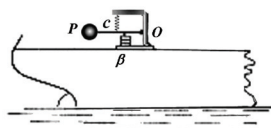


Рис. 5

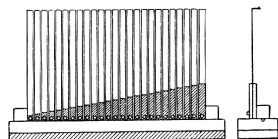


Рис. 6

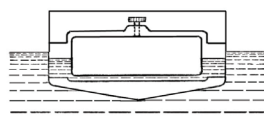


Рис. 7

В 1911 г. Фрам предложил цистерны для успокоения бортовой качки корабля. Цистерны представляют собой два резервуара, частично заполненных водой и соединенных двумя трубами и описаны в работе [12, с. 196] (см. рис. 7). Вода, переливающаяся из одного резервуара в другой, является поглотителем колебаний. При этом степень сопротивления регулируется воздушным клапаном, которым снабжена верхняя труба. Это устройство успешно применялось на больших пассажирских пароходах. Впоследствии, будучи директором фирмы «Блом и Фосс», Г. Фрам активно внедрял свои изобретения в практику судостроения. В частности, его цистерны планировали установить на русских линейных крейсерах типа «Измаил», водоизмещением свыше 32 тис. т. В феврале 1913 г. была образована комиссия под руководством генерал-лейтенанта флота А. Н. Крылова, которая зафрахтовала пароход «Метеор», оснащенный цистернами Фрама, и проверила их работу в Атлантическом океане [7, с. 207–214]. Для фотозаписи качки корабля А. Н. Крылов изобрел специальный прибор. В результате испытаний комиссия одобрила идею установки цистерн Фрама на линейных крейсерах, а А. Н. Крылов разработал их теорию и опубликовал на эту тему ряд специальных статей [7, с. 214]. Однако, спущенные на воду линейные крейсера «Измаил», «Бородино», «Кинбурн» и «Наварин» до революции в строй не вошли, а после окончания Гражданской войны были проданы на слом.

Именно в морском флоте были созданы и первые успешно работающие гироскопические системы. В 1880-е гг. австрийский инженер Л. Обри, работавший на заводе Уайтхеда в Фиуме, создал прибор для удержания торпеды на курсе (рис. 8). Система использовала свободный гироскоп в кардановом подвесе и работала в режиме автоколебаний. Перед запуском торпеды ротор гироскопа разгонялся специальным устройством, а затем прибор работал на выбеге. При отклонении торпеды от заданного курса внешнее кольцо карданового подвеса гироскопа переставляло золотник пневматического регулятора, который воздействовал на рули торпеды, возвращая ее на курс.

В начале XX в. были сделаны первые попытки использования гироскопов для угловой стабилизации. Первым успехом в этом деле был гироскопический успокоитель качки корабля, предложенный в 1904 г. О. Шликом [13, с. 334–337]. В этом устройстве массивный ротор приводится во вращение паровой турбиной (рис. 9). Ротор 1 расположен в камере 2, которая может качаться по отношению к корпусу судна вокруг перпендикулярной оси. Эти качания гасятся с помощью гидравлического или ленточного тормоза 3. Центр масс системы маховик — рама находится ниже оси подвеса, чтобы ось ротора при отсутствии возмущений располагалась вертикально. Данное устройство испытывалось на небольших судах водоизмещением 56 и 90 т и показало хорошие результаты — амплитуда качки не превышала 1–2°.

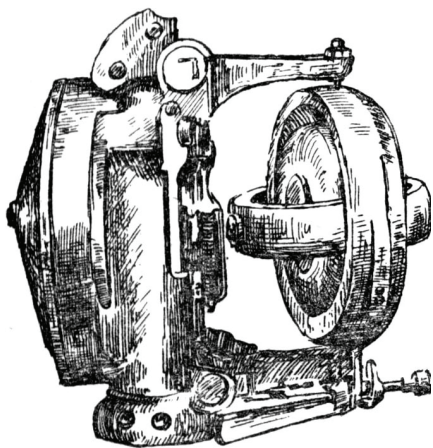


Рис. 8

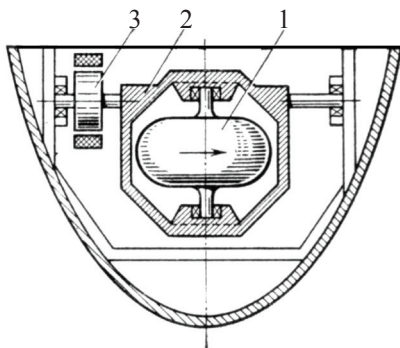


Рис. 9

Первой теоретической работой, посвященной гироскопическому успокоителю, была работа Г. Лоренца, в которой он рассмотрел свободные колебания системы успокоитель — судно в предположении, что продольная ось судна горизонтальна и неподвижна. Этот же вопрос изучался А. Фёпплем, указавшим в работе «Теория успокоителя Шлика» (*Föpple A. Die Theorie des schlickischen Schiffskreisels. — VDIztschr., 1904, Bd. 48, N 14, S. 481–483*) на пользу тормозов в успокоителе для погашения колебаний судна. Фёппль также предложил приближенную формулу, позволяющую определить необходимый кинетический момент гиросtabilизатора.

Успокоитель системы Шлика имел существенные недостатки и вскоре был вытеснен активными успокоителями, имевшими бóльшую эффективность. Однако разработанная теория гироскопического успокоителя сыграла важную роль для создания гироскопического стабилизатора вооружения, гироскопа, автопилота, навигационных приборов ракет и др. Впоследствии теория гироскопических систем выделилась в самостоятельную область механики, имеющую особенно большое значение в оборонной и аэрокосмической отраслях.

Именно в кораблестроении появился и первый учебный курс теории механических колебаний. В 1907 г. А. Н. Крылов издал в литографированном виде лекции, читавшиеся для кораблестроительного отделения Петербургского политехнического института по курсу «Вибрация судов». В 1936 г. был опубликован капитальный труд А. Н. Крылова «Вибрация судов» [10], являвшийся учебным руководством для кораблестроительных вузов. При написании этой книги Алексей Николаевич полностью использовал свои ранее опубликованные работы, посвященные колебаниям.

Позже, с развитием машиностроения, расчеты конструкций на колебания стали неотъемлемой частью расчетов на прочность, часто определяющей работоспособность машины. Теория механических колебаний, начинавшаяся с отдельных задач в кораблестроении, выросла к началу 40-х годов XX века в самостоятельную отрасль механики.

Литература:

1. *Ларин А. А.* Становление теории колебаний механических систем: исторический обзор / А. А. Ларин // Дослідження з історії техніки Зб. наукових праць. — К.: НТУУ «КПІ», 2006. — Вип. 8. — С. 41–50
2. *Пановко Я. Г., Губанова И. И.* Устойчивость и колебания упругих систем / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. — М.: Наука, 1979. — 384 с.
3. *Тимошенко С. П.* Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
4. *Шершов А. П.* История военного кораблестроения / А. П. Шершов. — СПб.: Полигон, 1994. — 360 с.
5. *Бережных О.* Найголемите кораби / О. Бережных. — М.: Наука, 1979. — 160 с.
6. *Ейлер Л.* Полное умозрение строения и вождения кораблей / Л. Эйлер. — СПб.: 1778. — 433 с.
7. *Крылов А. Н.* Воспоминания и очерки / А. Н. Крылов. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 884 с.
8. *Бишон Р.* Колебания / Р. Бишон. — Варна: Книгоиздательство «Георги Бакалов», 1988. — 116 с.
9. *Ларин А. А.* Развитие методов расчета крутильных колебаний в Харьковском политехническом институте с 1939 по 1970 годы / А. А. Ларин // Вестник НТУ «ХПИ». Динамика и прочность машин. — Харьков, 2007. — Вып. 22, С. 90–98.
10. *Крылов А. Н.* Вибрация судов. Собрание трудов Т. 10. / А. Н. Крылов. — М–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 402 с.
11. *Тимошенко С. П.* Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. — М.: Гос. изд-во физ-мат литературы, 1959. — 439 с.
12. *Тимошенко С. П.* Теория колебаний в инженерном деле / С. П. Тимошенко. — М.: ОНТИ, 1934. — 344 с.
13. *Ишлинский А. Ю.* Механика: идеи, задачи, приложения / А. Ю. Ишлинский. — М.: Наука, 1985. — 624 с.