

Вычислительные эксперименты с последовательным формированием моделей гидромеханики корабля в штормовом море*

(гидромеханика плавания на гравитационной поверхности сплошной среды)

Прямой вычислительный эксперимент в корабельной аэрогидромеханике может служить доступным инструментарием для инженерных изысканий как в проектировании новой морской техники, так и в штормовых испытаниях при обосновании наставлений мореплавателям по эффективности ведения морских работ и поддержке дальних коммуникаций. Математическая модель гидромеханики корабля, так же как и для нестационарных групповых структур морского волнения и их силового взаимодействия, не в полной мере предваряются аналитикой для представления изучаемых процессов в режиме поверочных вычислений. Современный вычислительный эксперимент отчасти расширяет и связывает воедино хорошо отработанные математические модели с инженерными эмпириками в алгоритмах для непосредственного представления весьма сложных процессов нестационарной гидромеханики [13]. Возможность последовательного включения факторов реальной гидромеханики служит обоснованием корректности проведения прямых вычислительных экспериментов, в их развитие до условий интенсивного взаимодействия с крупным морским волнением, включая ударные нагрузки и катастрофические последствия захвата корпуса гребнями волн. Важным компонентом таких экспериментов представляется интерактивное управление маневрированием корабля, что требуется для задействования нового инструментария как в качестве штурманской экспертной среды, так в качестве тренажера для получения навыков эффективного и безопасного штормового кораблевождения.

* В. Храмушин.

*Подсекция мореходных качеств судов в штормовых условиях,
Российского Научно-инженерного общества корабелов имени А. Н. Крылова;*

Предисловие и алгоритмические решения

Управляемое движение корабля в условиях интенсивного штормового волнения представляется весьма показательной задачей практической гидромеханики в плане построения последовательности прямых вычислительных экспериментов на этапах совершенствования математических, вычислительных и чисто алгоритмических или инженерных моделей гидромеханики.

Универсальная среда программирования в реализации единого комплекса вычислительных экспериментов опирается на специальную тензорную математику [12] для достижения наглядности и эффективности моделирования пространственного движения в базисах корабельных и морских координат, с быстрыми перестроениями пространственных распределений скоростей течений и давлений воды на подвижных поверхностях смоченной обшивки корпуса корабля, маневрирующего в условиях силового воздействия интенсивных потоков в групповых структурах трохоидальных прогрессивных и стоячих волн под штормовой поверхностью моря.

1. Поверочным вариантом моделирования динамики корабля, не требующим установления процессов гидромеханики из состояния без хода на тихой воде, сделано скольжение по градиентам подвижной поверхности волновых склонов. Модель плавно управляется по курсу и скорости хода, с отслеживанием ходкости, рыскания и всех других инерционных реакций в свободном движении по усредняемому облаку точек на условно «твёрдой» поверхности воды, в темпе подвижной поверхности волн.

В иных вариантах вычислительного эксперимента положение корпуса корабля подвижно относительно поверхности моря, с возможностью

полного отрыва или погружения, с выявлением опасностей опрокидывания или разрушительных гидродинамических ударов по бортовой обшивке.

2. Гидростатическая постановка на волну, или Архимедов вариант штормовой гидродинамики корабля основан на вычислении элементарных подводных объемов относительно точки в центре площади действующей ватерлинии. Под действием строго вертикального гравитационного потенциала, как разности сил тяжести и плавучести, проявляется вертикальная качка. За счёт быстрых смещений центра величины в горизонтальной плоскости возникает качка килевая и бортовая. В таком варианте получается устойчивое решение, где поверяются мореходные качества при явных и качественно объяснимых гидродинамических воздействиях на крупной волне. Недостающие три степени свободы: рыскание, продольные и поперечные смещения моделируются при включении в расчёт перепадов уровней воды на противоположных бортах корпуса.

3. Практически неотличимыми от гидростатической постановки получаются результаты интегрирования распределённого давления по смоченной поверхности корпуса, где перепады уровня на противоположных бортах естественным образом дополняют силы и реакции по всем шести видам пространственного движения, без каких-либо искусственных включений. Гидростатические компоненты интегрируются с учётом точного местоположения центров действия сил, концентрирующих давление воды по треугольным элементам бортовой обшивки. При интегрировании по смоченной обшивке корпуса не вносятся погрешностей от некой неопределённости формы поверхности действующей на крупной волне ватерлинии.

4. Распределённые по смоченной поверхности вихреисточники моделируют воздействие ходового потока. Простой слой распределенных ис-

точников и стоков с интенсивностью нормальной компоненты скорости обеспечивает условие непротекания, при этом, стоки в зонах пониженного давления должны корректироваться для учета вязкости или отрывных явлений в сходящемся потоке воды, что необходимо для ослабления взаимокompенсацию внешних воздействий по «парадоксу Д'Аламбера». Скользящие компоненты ходового потока подтормаживаются в оконечностях, создавая симметричные повышенные давлений. Впервые ставится вопрос соотношения локальных скоростей с неким интегральным потоком вблизи корпуса корабля, который по серии опытовых экспериментов пока свёлся к простому выбору неискаженной скорости хода корабля.

Корабельные обводы в таком эксперименте могут оптимизироваться по условиям минимизации ходового дифферента, в том числе на сверхбольших скоростях хода с корабельной волной длиннее штормовых.

5. При моделировании штормовых воздействий добавляются весьма интенсивные потоки в толще трохоидальных волн, отчего на обшивке искажается распределение давлений под действием касательных скоростей, возникают сильные, иногда ударные импульсы сил из условий непротекания. Вихреисточниками моделируется корабельное волнообразование совместно с изменением уровня при отражении штормовых волн. Однако, здесь пока не проводится ресурсоёмкое моделирование интерференции уже отражённых корпусом волн, и не проводится итерация для уточнения контуров обновлённых ватерлиний, которые на сломах палуб и надстроек обретают иную гидромеханику.

6. По умолчанию в эксперимент включается чисто кинематический эффект захвата корпуса потоками воды в толще трохоидальных волн. Внутри корпуса возникают ускорения под гребнями штормовых волн, и

сильные реакции на плече от центра масс к центру внешних гидродинамических сил. Динамический тензор присоединенных масс как реакция окружающей воды учтены корректирующими коэффициентами, близкими к единице для поперечных движений корпуса и рыскания, с ослаблением для продольных смещений, вертикальной, бортовой и килевой качки, где существенны гидростатические восстанавливающие моменты.

Эксперимент позволяет отработать обводы средней части корпуса из условия взаимокompенсации кренящих моментов от штормовых волн в сопоставлении с кинематикой волновых потоков. Интенсивность бортовой качки, даже при высоко разнесённых по аппликате центрах масс и гидродинамического сопротивления, может быть многократно минимизирована.

В моделирование морского волнения также предусматривается выбор вариантов, в том числе позволяющих оценивать условия штормового маневрирования корабля на мелкой и глубокой воде:

1) с использованием равномерной прямоугольной сетки, и регуляризованной сетки с переменным шагом [11], динамически адаптируемым под крутизну и скорости течений в гребнях волн;

2) морское волнение представляется либо в полных потоках со скоростями течений не зависящими от глубины, либо трохоидальными волнами [14] с экспоненциальным затуханием скоростей течений с глубиной;

3) вариант моделирования морского волнения без искажения поверхности при взаимодействии с корпусом корабля, или полная разностная модель с моделированием трансформации волн после отражения от корпуса корабля.

В последнем наиболее ресурсоёмком варианте моделирования морского волнения контур действующей ватерлинии выстраивается как с учётом взаимной интерференции волн, так и с учётом её мгновенной трансформации у борта корабля. Однако, именно для этого эксперимента актуальны вопросы корректности быстрых смещений корпуса с ударными гидродинамическими нагрузками, разрешение которых в будущем потребует многократного увеличения вычислительных ресурсов, и, к сожалению, без особо существенного влияния на результаты моделирования.

1. Особенности цифрового построения геометрической модели корабля

В качестве цифровой модели корпуса корабля выбрана традиционная таблица плазовых ординат, дополняемая прорисовкой штевней с расширениями для корректировки объёмов транцевых и бульбовых образований в оконечностях [9]. Последовательное интегрирование по обшивке корпуса внутри отдельных шпаций необходимо для построения быстрых алгоритмов по условиям обработки точек пересечения шпангоутов с быстропеременным уровнем воды вблизи борта корабля. Не исключается работа с цифровыми моделями многокорпусных судов, при некоторых исключениях ввиду недостаточности информации для полноценного формирования штевней. По надводной части применяются особые геометрические алгоритмы, позволяющие относительно корректно обрисовывать общекорабельную архитектуру, что важно при изучении опасных режимов штормового маневрирования корабля.

В действующих на 2024-12-06 геометрических алгоритмах поверхность действующей ватерлинии формируется треугольниками из общего центра площади для всех элементарных фрагментов действующей ватерли-

нии. Для ускорения вычислений элементарные треугольники не группируются в большие связные фрагменты, что привносит некоторые погрешности на сильно искривлённых поверхностях крутых склонов и гребнях волн, не особо значимые для однокорпусных моделей.

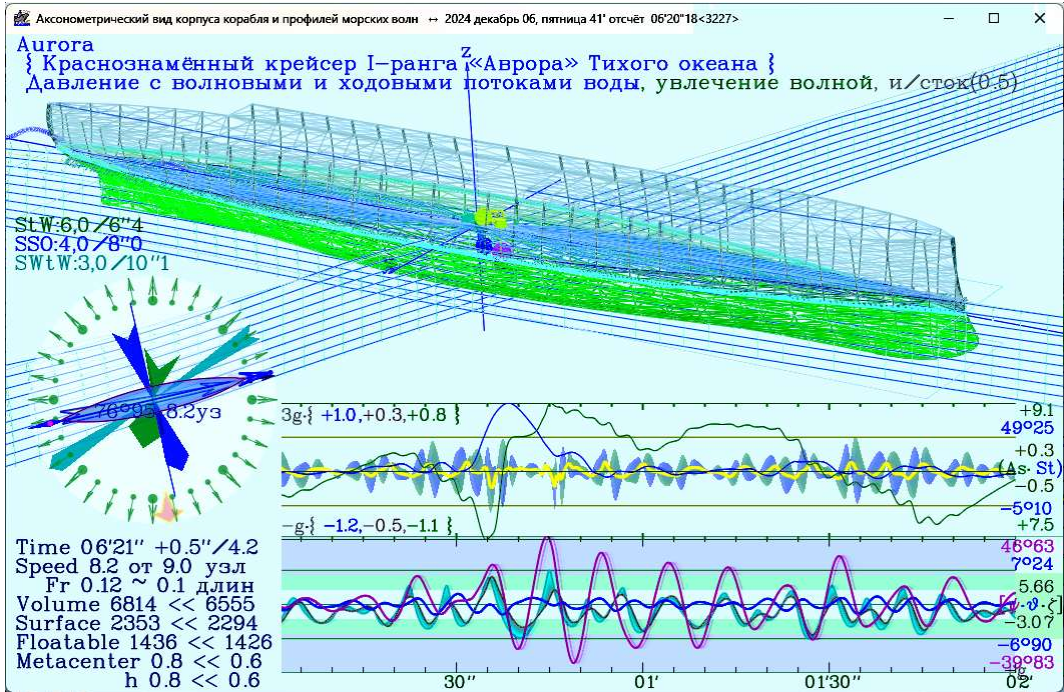


Рис. 1. Разбивка активной поверхности корабля на шпации с контурами штевней в оконечностях, внутри которых обеспечивается быстрая триангуляция на пересечении поверхности борта с быстроизменяющимся контуром действующей ватерлинии. Ватерлиния разделяется на замкнутые фрагменты. Внутри корпуса изображаются мгновенные положения всех геометрических центров и гидродинамических метацентров.

На рисунке 1 изображен корпус корабля с триангуляцией по шпации теоретического чертежа. Справа показана картушка компаса с показаниями текущего и заданного курса; аксиометра пера руля, кренометра и

трёх систем штормовых волн с отображением максимальной крутизны. В табличке сверху сведены направления, высота и периоды для действующих в эксперименте групповых структур штормового волнения, в центре картушки дублируются мгновенные значения курсов и скорости хода.

В текстовом фрагменте под картушкой показано: t – время эксперимента, δt – шаг и t_{krat} – дробление по критерию устойчивости [сек]; v – текущая и заданная скорости в узлах, в числах Фруда и в соотношениях длины корабельной волны с длиной корпуса; и ниже гидростатические характеристики: V – объёмное водоизмещение, площади S – смоченной поверхности и F – ватерлинии, m – аппликаты метацентра и величина h – метацентрической высоты – мгновенные и исходные по тихой воде.

Справа внизу на верхнем блоке графиков прорисовываются v - скорости хода, χ – углы рыскания, ζ'' – вертикальные ускорения в средней части корпуса и в оконечностях, в нижнем блоке углы ϑ - крена, φ – дифферента и ζ – вертикальные смещения и z_w – отсчёты уровня по волне в средней части корпуса.

2. Гидростатическая постановка на волну

Возможность выбора или последовательное усложнение математических моделей штормовой гидромеханики корабля предусматривается либо в установках начальных условий, либо интерактивно, непосредственно в процессе проведения вычислительного эксперимента.

Первым чисто динамическим приближением модели маневрирующего на крупном морском волнении корабля принимается его простое скольжение по условно твёрдой и подвижной поверхности, для чего вы-

числяется осреднённый градиент волнового склона по группе точек внутри действующей ватерлинии. Получается удобный отладочный режим моделирования, с наглядной отработкой вопросов ходкости и управляемости на волнении без опасности опрокидывания маневрирующего корабля. Здесь же проводится наблюдение за геометрическими размерениями и характером моделируемого волнения. Быстрый интерактивный переход в режим скольжения по волне возвращает модель в приемлемое положение, что необходимо в случаях опрокидывания в режимах моделирования с реальной гидромеханикой.

В динамических приближениях теории корабля всегда упоминается гидростатическая постановка корпуса на волну, как модели «усиленной в сторону опасности» по качке и рысканию под ударами гребней высоких волн. Гидростатическая постановка моделируется простым интегрированием погруженного объёма корпуса, с последующим сопоставлением геометрических трансформаций с исходным положением корабля на тихой воде.

Водоизмещение:

$$W = \iiint_{\Omega} dw, \quad [M^3]$$

где Ω – погруженный объем корпуса за смоченной обшивкой с учётом изменённой посадки корпуса и действующего морского волнения.

Положение центра величины (центра плавучести):

$$\vec{C} = \frac{\iiint_{\Omega} \vec{r} dw}{W}, \quad [M],$$

где: r – вектор местоположения элементарного подводного объема dw .

Приращение скорости поступательного движения корпуса за расчётный шаг времени δt :

$$\delta \vec{V} = g \cdot \frac{\vec{n} \cdot M + \rho \cdot \vec{S} \cdot W}{M} \cdot \delta t, \quad [\text{м/с}]$$

где: g – ускорение свободного падения; M – масса корабля; n и S – единичные орты гравитационный вертикали и встречного вектора осредненной площади действующей ватерлинии; ρ – плотность воды.

Приращение угловой скорости поворота корпуса относительно центра масс:

$$\delta \vec{\omega} = \frac{M}{J} (\vec{G} - \vec{C}) \times \delta \vec{V}. \quad [\text{рад/с}]$$

Тензор инерции J в смешанном базисе. Вектор плеча вращательного момента $G - C$ на практике связан с поправками по присоединенным массам окружающей воды и эффектами крыла, как динамического перераспределения давлений по обшивке движущегося корабля.

Без учёта скорости хода корабля и потоков в толще воды под морским волнением, в точности аналогичный гидростатическому результату, получается расчёт интегрированием распределённых векторных сил давления воды по элементарным площадкам смоченной бортовой обшивки корпуса.

Водоизмещение:

$$\vec{W} = \iint_S z_w \cdot \delta \vec{s}, \quad [\text{м}^3]$$

как интегральный вектор сил давления, распределенных по бортовой обшивке.

В таком варианте нет необходимости в интегрировании осреднённого градиента S по действующей ватерлинии, и вращательные моменты вы-

числяются непосредственно по распределенным силам на элементарных площадках бортовой обшивки s :

$$\vec{R} = \iint_s \vec{r} \times \delta \vec{s}, \quad [\text{м}^3]$$

и тогда приращение скорости вращения за интервал времени δt :

$$\delta \vec{\omega} = g \cdot \frac{\vec{R}}{J} \cdot \delta t, \quad [\text{рад/с}]$$

Использование гидростатических зависимостей формально означает корректное моделирование гидромеханики корабля, однако, теоретически это не противоречит возникновению неугасающих вертикальных колебаний корпуса, с килевой и бортовой качкой, отчасти ослабляемыми лишь весьма малыми эффектами сеточной вязкости.

В отличие от законов динамики твёрдого тела, в качестве массы и центра инерции надводного корабля необходимо считать суммарную величину собственно корабля с захватываемой в ускоренное движения забортовой водой, с соответствующим смещением центра масс к среднему между ними положению. В первом приближении для удлиненного корпуса корабля можно считать объём присоединенной массы воды соизмеримым с массой корабля, что справедливо для боковых и вертикальных смещений. Величиной присоединенных масс для продольных смещений можно пренебрегать. В движении корабля также требуется учёт перераспределения давлений с учетом безотрывного стока потока с плавникового крыла ахтерштевня, для чего приближенно гидродинамический центр смещается в нос в положение одной трети длину корпуса, и что сказывается на условия маневрирование тем сильнее, чем больше скорость хода корабля.

Корабль в штормовом море, как водоизмещающий объект, увлекается волновыми потоками по чисто кинематическим правилам «как волна». При этом его движение как твёрдого тела и накопление кинетической энергии существенно не зависят от движений в волновом потоке. При этом, возникают существенно большие ускорения движению, которые во вне проявляются в качестве сильных кренящих моментов ввиду разницы аппликат центров водоизмещающих объёмов, как условных центров бокового сопротивления движению, и центров масс надводного корабля, который всегда удерживается значительно выше для обеспечения плавности бортовой качки.

3. Влияние присоединённых масс и вязкости воды, демпфирование качки корабля

Дифференциальное уравнение малых свободных колебаний корпуса включают инерционные и демпфирующие компоненты для восстанавливающих и дрейфовых сил и моментов в локальной системе координат. Выражения с собственными колебательными движениями под действием восстанавливающих реакций записываются для ϑ – бортовой, ψ – килевой и ζ – вертикальной качки. Демпфирующие поправки служат ослаблению собственных скоростей относительно внешней среды: χ – рыскания; η – поперечного дрейфа и ξ – продольных пульсаций скорости хода.

Параметры демпфирования наведённых скоростей задаются коэффициентами гашения скорости в линейных уравнениях движения:

$$\begin{aligned} (M + \lambda_{33}) \cdot \ddot{\zeta}_g + \mu_{33} \cdot \dot{\zeta}_g + g \cdot \rho \cdot S \cdot \zeta_g &= 0; \\ (J_{xx} + \lambda_{44}) \cdot \ddot{\vartheta} + \mu_{44} \cdot \dot{\vartheta} + g \cdot M \cdot h_0 \cdot \vartheta &= 0, \end{aligned}$$

где h_0 – начальная метацентрическая высота, для более всего интересных вертикальной и бортовой качки. После приведения к канонической форме:

$$v_{\zeta} = \frac{\mu_{33}}{2 \cdot (M + \lambda_{33})};$$

$$v_g = \frac{\mu_{44}}{2 \cdot (I_{xx} + \lambda_{44})}$$

получаются линейные факторы демпфирования скорости с обратной зависимостью от инерционной массы корпуса M и J в сумме с аналогичными присоединенными массами увлекаемой корпусом окружающей воды λ_{33} и λ_{44} , соответственно. Круговые частоты собственных колебаний получаются из детерминантов дифференциальных уравнений:

$$\omega_{\zeta} = \sqrt{g \cdot \rho \cdot S / (M + \lambda_{33})};$$

$$\omega_g = \sqrt{g \cdot M \cdot h_0 / (J_{xx} + \lambda_{44})},$$

где S – площадь ватерлинии, и служат контролю корректности проводимого вычислительного эксперимента. В исходных данных параметр демпфирования задаётся положительной величиной с некоторыми оптимальными значениями: $\nu \in [0 \div \infty[$, где увеличение μ усиливает торможение всякому движению.

$v_{\xi, \eta, \zeta} = \{ 0.05, 0.4, 0.3 \}$ – продольной, поперечной и вертикальной качки.

$v_{\vartheta, \psi, \chi} = \{ 0.1, 0.3, 0.4 \}$ – для бортовой, килевой качки и рыскания.

Для ускорения вычислений используется предвычисленная величина:

$$v_{\{\vartheta\psi\zeta\chi\eta\xi\}} = \frac{1 - e^{-\mu \cdot \delta t}}{\mu \cdot \delta t}.$$

Абсолютная жесткость цифровой модели корпуса корабля требует усиленного демпфирования концентрированных гидродинамических ударов на поверхностях обшивки корпуса. Для традиционных однокорпусных обводов достаточно применения фактора гашения больших приращений скоростей третьего порядка, с искусственным покомпонентным ограничением максимальной величины:

$$\vec{V} = v \cdot \vec{V} \cdot (1 - \tanh(\mu \cdot V^2 \cdot \delta t) / 2).$$

Для глиссирующих обводов с обратной кривизной днищевой обшивки требуется, для ослабления гидродинамических ударов может потребоваться значительное увеличение факторов демпфирования по килевой и вертикальной качке.

4. Корабельное волнообразование и отражение морских волн

Практическая гидромеханика корабля начинается в интегрировании перепадов давлений под воздействием потоков воды вблизи смоченной обшивки корабля. В первом приближении трансформация окружающего волнового поля может выполняться без учёта интерференции, рефракции, и без других эффектов взаимовлияния волновых структур.

Практическая гидромеханика силового взаимодействия корпуса корабля с морским волнением может строиться с ориентацией на методы решения задач о корабельном волнообразовании, когда по смоченной обшивке корпуса распределяются вихреисточники, настраиваемые на условия не протекания и сбалансированность интегрального потока вдоль корпуса.

Простой слой с разрывом нормальной компоненты скорости на смоченной обшивке корпуса формально определяет ширину (толщину) корпу-

са и моделируется слоем источников и стоков, и компенсирует встречный ходовой и волновые потоки:

$$\delta \overset{\leftarrow}{f}_n / \rho = (\Delta p_n / \rho) \cdot \overset{\leftarrow}{\delta s} = 0,5 \cdot (\overset{\leftarrow}{n} \cdot \overset{\leftarrow}{v}_n) \cdot |\overset{\leftarrow}{n} \cdot \overset{\leftarrow}{v}_n| \cdot \overset{\leftarrow}{\delta s},$$

где: Δp – изменение давления воды на элементе бортовой обшивки; δf – расчётный вектор силы; n – единичный орт нормали на элементе бортовой обшивки. Набегающий поток компенсируется встречным вектором источника со знаком «плюс», обратный поток в зоне условного разрезания получается со знаком «минус».

Проскальзывающий поток вблизи смоченной бортовой обшивки моделируется вихревым слоем, и также частично влияет на давление воды вблизи бортовой обшивки в соответствии с законом Бернулли, и порождает небольшой вектор силы в направлении нормали к элементарным расчётным площадкам:

$$\delta \overset{\leftarrow}{f}_n / \rho = (\Delta p_s / \rho) \cdot \overset{\leftarrow}{\delta s} = 0,5 \cdot (V^2 - |\overset{\leftarrow}{n} \times \overset{\leftarrow}{v}_s|) \cdot \overset{\leftarrow}{\delta s},$$

где V – скорость хода корабля и набегающего волнового потока.

По аналогии с методами теории крыла интенсивность распределенного вихревого слоя может перебалансироваться (перераспределяться) так, чтобы под кормовым подзором и на руле управления образовывался неразрывный поток, что формально образует эффект крыла с существенным смещением гидродинамического центра бокового сопротивления к носовой оконечности (для этого берется разность интенсивностей на противоположных сторонах (бортах) плавникового ахтерштевня, и эта постоянная величина добавляется ко всем расчетным площадкам для выравнивания интенсивности вихреобразования под кормовым подзором...)

В целом:

$$\delta \overset{\leftarrow}{f}_\Delta / \rho = (\Delta p / \rho) \cdot \overset{\leftarrow}{\delta} s = g \cdot h \cdot \overset{\leftarrow}{\delta} s = 0,5 \cdot (V^2 - |n \times \overset{\leftarrow}{v}_s|^2 \pm (n \cdot \overset{\leftarrow}{v}_n)^2) \cdot \overset{\leftarrow}{\delta} s,$$

где h – уровень воды под волновым склоном вблизи бортовой обшивки.

В вычислительном эксперименте встречный ходовой поток влияет на динамическую посадку корабля; на ходовой дифферент или проектную сбалансированность корабельного волнообразования; на условия глиссирования или тенденции к заныриванию (погружению носовой оконечности – отрицательному ходовому дифференту) в носовой оконечности под встречный поток. Аналогичная интерпретация потоков в толще воды под штормовыми волнами, к примеру, может служить проверке гипотезы повышенной опасности для характерных обводов корпуса при чисто гидростатической постановке корабля на штормовую волну, с возможностью уточняющей оптимизации формы корпуса по результатам из серии вычислительных экспериментов на интенсивном трохоидальном волнении).

5. Групповые структуры морского трохоидального волнения

Математическая модель трохоидального волнения $\overset{\rightarrow}{\zeta}(t, s, z)$ записывается в векторной форме на плоскости профиля $w \in \{s, z\}$ по направлению распространения фронта волны s с гравитационной вертикалью z . Фазовый отсчёт фронта волны в вычислительном эксперименте исходит из нулевого начального времени t и полудлины диагонали модельной акватории Lb :

$$\varphi_w = 2\pi \cdot (t \cdot C_w - s - Lb/2) / \lambda,$$

где: λ — длина волны, движущейся со скоростью C_w , в плоскости профиля $w \in \{s, z\}$ на момент времени t , из исходного местоположения s , с учётом центровки начальных отсчётов относительно половины диагонали цифрового опытового бассейна Lb .

Граничными условиями вокруг прямоугольной расчётной акватории предопределяется полувысота волны с помощью трохоидального радиуса r_w на уровне невозмущенной поверхности моря $z = 0$, от которой выполняется уточнение орбитального радиуса элементарной частицы, в зависимости от её мгновенной глубины под свободной поверхностью:

$$r_z \approx \exp(2\pi \cdot z / \lambda).$$

Максимальная амплитуда в гребне волны [13] оценивается приближенно как: $R^{up} \approx 1,134 \cdot r_w$, что по величине заметно больше сопутствующего отлива во впадине $R_{dn} \approx 0,614 \cdot r_w$. Таким образом, высота трохоидальной волны отличается от размерений длины пробега циклоиды $h = \lambda / \pi$ или $r_w = \lambda / 2\pi$, и принимается в расчётах приближенно как: $h \cdot k \approx 0,75$ или $\lambda / h \approx \pi \cdot 8 / 3 \approx 8,38$, где h — видимая высота чисто прогрессивной волны от подошвы до гребня. В алгоритмических моделях волновых процессов удобно использовать коэффициент: $H_w = 8/3 \cdot \pi \cdot h / \lambda$, нормированный относительно максимально допустимой высоты обрушающихся трохоидальных волн, где: $h = 2 \cdot r_w$ — предельная высота волны в качестве удвоенного условного радиуса поверхностной трохоиды.

Частицы жидкости движутся по собственным трохоидальным траекториям, где давление волны выравняется соотношениями глубины и локальной скорости этих частиц под волновыми склонами. Симметричная поправка относительно фазы волны $Cr \approx [0 \div H_w \div 1]$ к локальному заглубле-

нию r_z отчасти согласует осреднённый или равнообъёмный уровень воды для гребней с заострёнными вершинами и гребней кноидальных волн.

По наблюдениям моделируемых в вычислительных экспериментах волновых процессов, поправка на средний уровень будет служить в качестве коэффициента крутизны волны: $Cr \approx H_w$.

При необходимости вводится дополнительная ассиметричная поправка к профилю волны для учёта ветровых напряжений: $Wd [0 \div \sqrt{0,5} \div 1]$:

$$r_z \times = \exp(2\pi \cdot r_z \cdot Wd \cdot (\sin \varphi_w - 1) / \lambda),$$

которая может применяться исключительно к ветровому волнению с осреднённо значимым сдвигом, как:

$$Wd \approx \sqrt{0,5} \approx 0,7071.$$

Групповые структуры волнения образуют ромбические ячейки с вытянутостью в направлении распространения гребней: $L_g = \lambda \cdot 8.89$, а наибольшая протяжённостью фронта – ширина ромбического фрагмента акватории:

$$F_g = 2\pi \cdot \lambda / H_w$$

обратно пропорциональна относительной высоте девятого вала в центре групповой структуры волн.

Собственно профиль математической модели поверхностной волны строится в векторной форме на основе локального радиуса r_z , применяемого для простого гармонического смещения частиц воды от их исходно нейтрального положения:

$$\vec{\zeta} \pm = r_z \cdot \left\{ -\cos \varphi_w, \sin \varphi_w \right\}.$$

В гравитационной волне частицы жидкости движутся по трохоидальным орбитам со строго одинаковыми угловыми скоростями:

$$V_r = \omega \cdot r_z, \quad [\text{м/с}]$$

определяющими фазовую скорость свободного движения гребня прогрессивной волны:

$$C_w = \lambda / \tau = \omega / k. \quad [\text{м/с}]$$

Принимая надводное пространство (воздух) условно невесомым, погружение частицы жидкости отсчитывается от уровня волновых склонов, тогда как радиусы трохоид и кривизна траекторий частиц масштабируются в геометрических пропорциях трохоидальной волны в целом:

$$V_r = \omega \cdot r_z = \omega \cdot r_w \cdot e^{kz},$$

или, для поверхности моря:

$$V_w = \omega \cdot r_w \cdot \exp(2\pi / \lambda \cdot (z + r_w \cdot (\sin \varphi - 1))),$$

где: z – аппликата в глобальной декартовой системе отсчёта.

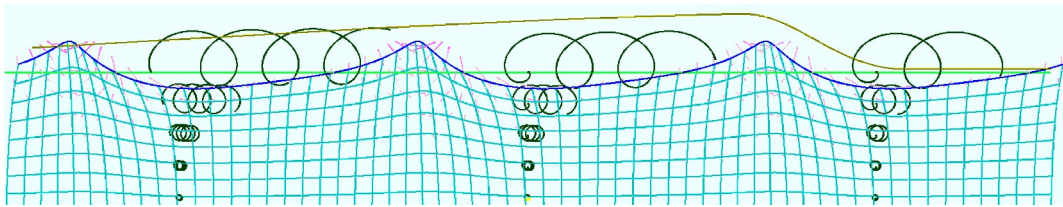


Рис. 2. Моделирование регулярных трохоидальных волн под действием напряжения приводного ветра с поправкой на смещение среднего уровня моря. Сетка под волной иллюстрирует дрейфовые смещение частиц и линии равного давления под поверхностью волны. Над волной показаны траектории частиц жидкости в движении по трохоидам с уменьшающимся с глубиной радиусам орбит.

На рисунке 2 приведены трохoidalные траектории дрейфовых течений в зависимости от относительной высоты гребня волны и заглублиения частицы жидкости. Максимальная скорость поверхностных течений достигается в гребне обрушающейся прогрессивной волны, и может приближаться по величине к фазовой скорости прогрессивной волны. Представленная модель морского волнения обеспечивает необходимый комплекс данных о состоянии моря для проведения штормового вычислительного эксперимента: гидростатическое давление и скорость течения воды в любой точке подводного пространства вблизи бортовой обшивки корабля.

6. Интерактивное правление курсом и скоростью хода корабля

Важной функцией вычислительного эксперимента является плавное регулирование скорости хода и скорости циркуляции при поддержании заданного режима штормового маневрирования, при которых не ограничивается свободная динамика ходкости и рыскание на курсе под воздействием штормового волнения.

Вышеописанная операция линейного демпфирования вполне адекватно применяется при небольших отклонениях от заданной ходкости $\dot{\xi}_i$ в условиях штормового плавания. Ускоренное приведение к заданной скорости формально предопределяется условной мощностью двигателей, и особо не влияет на её малые пульсации при небольшом усилении фактора демпфирования:

$$+\dot{\xi} / = (1 - \tanh^2(\dot{\xi}_i - \dot{\xi})) / 16.$$

времени с полной циркуляцией за 4, 2 или одну минуту.

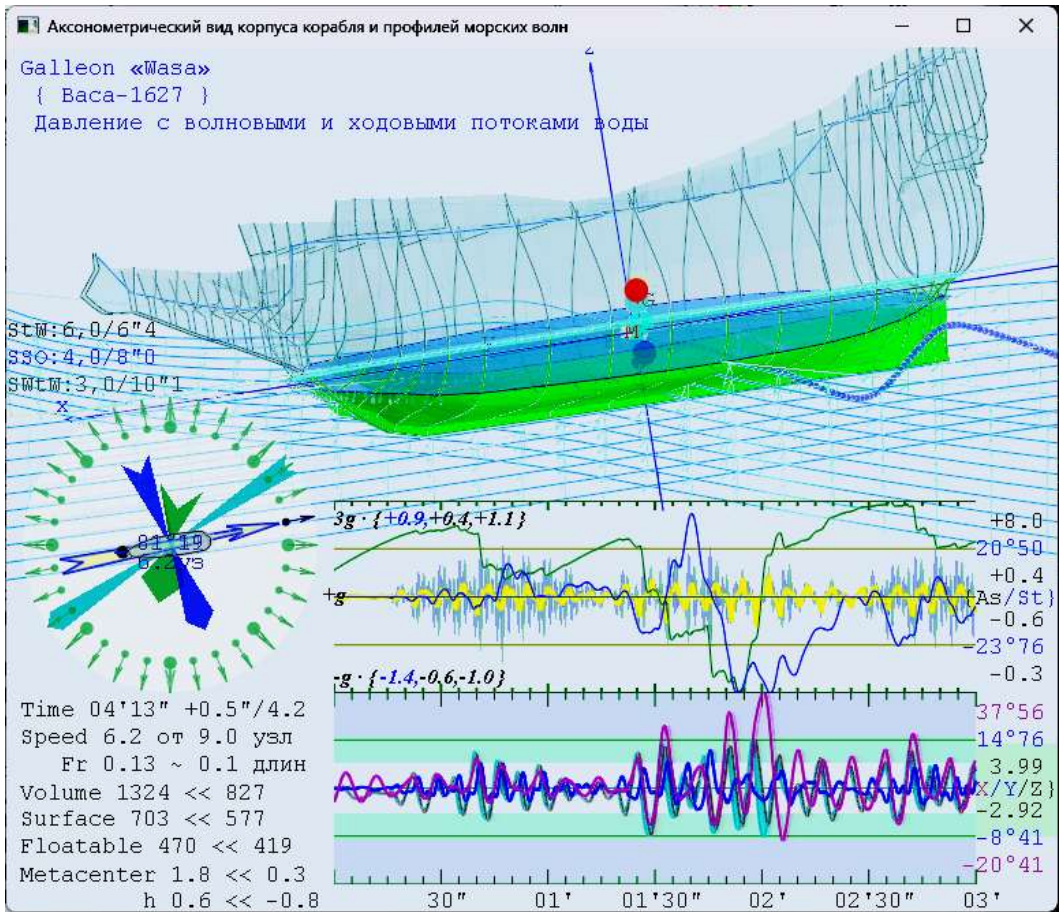


Рис. 3. Ход вычислительного эксперимента в окне для представления гидромеханики корабля. Вертикальная качка превышает 7 метров. Сильное рыскание и дрейф по курсу возникает в моменты экстремальной бортовой качки. Внизу графики бортовой X , килевой Y и вертикальной Z качки с масштабной шкалой справа. На левой шкале верхних графиков масштаб для кривых вертикальных ускорений.

Управление курсом корабля выполняется малыми приращениями угла направления $\delta\chi$, которые на тихой воде обеспечивают полную циркуляцию в трёх режимах: «Руль на борт» – за 1 минуту; «Полборта» – 2 мину-

ты; и «Помалу» – за 4 минуты. В штормовом плавании режим «Помалу» включается автоматически при отклонении от заданного курса на 1 румб ($11^{\circ}15'$), что не всегда достаточно для возвращения корабля на заданный курс.

Ускорение циркуляции и выход на заданный курс требует ручного управления с переключкой руля на «На борт» или «Полборта»:

$${}^+K.z += \min\max(-\delta A, \delta K.z, \delta A),$$

где: $\delta A = \delta t \cdot (\pi/120, \pi/60 \text{ или } \pi/30)$ – угол изменения курса за один шаг.

На крупной волне скорости циркуляции может быть недостаточно, и модель рискует встать лагом к волне, или перейти к дельфинированию и опасному брочингу (в текущей версии пока не оценивается обратное действие руля под обгоняющим потоком в гребне штормовой волны).

Управление ходом с помощью тяги двигателя и плавное регулирование курса позволяют моделировать возникновение крена на циркуляции с адекватным ходовым дифферентом при разгоне и торможении; с проявлением потерь хода на штормовом волнении и других эффекты качки и ходкости по всем шести степеням свободного маневрирования корабля.

Заключение

Вычислительные эксперименты с моделированием гидромеханики взаимодействия корабля и штормового океана крайне значимы в обоснованиях ключевых технических решений на ранних этапах проектирования перспективного всепогодного корабля, также как и в последующем синтезе положений морской грамотности с обновлениями наставлений мореплава-

телям для конкретных типов кораблей, для заданных навигационно-гидрографических и гидрометеорологических условий штормового мореходства. Прямое численное моделирование также востребуется в оперативной обстановке для экспериментальной проверки навигационных решений бортовыми счётно-решающими приборами, что важно в обеспечение действий корабля по прямому назначению; для оперативной подготовки оптимальных и безопасных маневров, выбора параметров наилучшей ходкости и/или обитаемости в сложных, штормовых или аварийных условиях кораблевождения на дальних коммуникациях и рыбных промыслах Дальнего Востока России.

По итогам последовательного проектирования и реализации прямых вычислительных экспериментов для моделирования гидромеханики корабля в условиях эмпирически сходного с реальным трохоидального штормового волнения, создан новый инструментальный комплекс «Auroga» для изысканий в области прикладной гидромеханики при изысканиях в области оптимального проектирования флота повышенной мореходности, с возможностью опытовой экспериментальной проверки эксплуатационной эффективности и безопасности штормового плавания корабля.

Актуальность создаваемого инструментария обуславливается уникальными особенностями дальневосточных морей, где ожидание хорошей погоды приводит к неприемлемым простоям и экономическим потерям от вынужденного штормования на условно «безопасных курсах» на глубокой воде вдали от побережья. Сопутствующее удорожание проектирования, постройки и эксплуатации океанского флота и всей прибрежной инфраструктуры характеризует морское хозяйство Дальнего Востока России, где «ограничения» общемировых правил среднеширотного мореходства воспол-

няются проектными решениями и наставлениями мореплавателям по всепогодному и непрерывному ведению морских работ с поддержанием дальних и каботажных коммуникаций под ураганными ветрами с интенсивным штормовым волнением.

Литература

1. *Войткунский Ярослав Иосифович, Фадеев Юрий Иванович, Федяевский Константин Константинович.* Гидромеханика. Л. Судостроение, 1968. – 568 с.
2. *Прандтль Людвиг.* Гидроаэромеханика. М. 2002. – 572 с. (Геттинген–1942)
3. *Кочин Николай Евграфович, Кибель Илья Афанасьевич, Розе Николай Владимирович.* Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1959, ч. I, 584 с., ч. II, 728 с.
4. *Семенов-Тянь-Шанский Владимир Вениаминович.* Статика и динамика корабля: Плавучесть, остойчивость и спуск на воду. Л.: Судостроение, 1973. – 607 с.
5. *Шебалов Александр Николаевич.* Нелинейная теория волн и волнового сопротивления: Учебное пособие. – Л.: Изд.ЛКИ, 1984. 107 с.
6. *Gerstner Franz Joseph:* 1802 “Theorie der Wellen,” Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaften, *Abhandlungen*; 1804 “Theorie der wellen samt einer daraus abgeleiteten Theorie der Deichprofile”. *Теория волн вместе с основанной на ней теорией волновых профилей* (Prague: Gottlieb Haase); sowie 1809 in *Annalen der Physik*, 32, 412–445.
7. *Mr. J. H. Michell* on the Wave-Resistance of a Ship. Волновое сопротивление корабля. *Philosophical Magazine*, 1898, vol.45, Ser.5, pp.106–123.
shipdesign.ru/JHM-rus.html
8. *Sommerfeld Arnold.* Mechanik der deformierbaren medien. Leipzig.: Zweite, neuberbeitete Auflage. 1949. (*Арнольд Зоммерфельд.* Механика деформируемых сред. М.: Издательство иностранной литературы, 1954. 491 с.)
9. *Храмушин В. Н.* «Hull» – Построение аналитической формы корпуса корабля, расчеты волнового сопротивления, кривых элементов теоретического чертежа и диаграмм остойчивости морских судов. Роспатент. Программа СахГУ № 2010615849 от 2010-09-08.
shipdesign.ru/SoftWare/2010615849.html

10. Богданов А. В., Храмушин В. Н. База данных: «Vessel» – Цифровые теоретические чертежи для проектного анализа гидростатических характеристик, остойчивости и ходкости корабля. Роспатент. База данных СПбГУ № 2015621368 от 2015.09.08.
shipdesign.ru/SoftWare/2015621368.html
11. Дегтярев А. Б., Богданов А. В. Храмушин В. Н. «Волна» – Интерактивный графический программный комплекс для построения и визуального анализа штормовой поверхности моря. Роспатент. СПбГУ № 2013619728 от 14 октября 2013 г. shipdesign.ru/SoftWare/2013619728.html
12. Храмушин В. Н. Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике. – Владивосток: ДВО РАН 2005. – 212с.
shipdesign.ru/Khram/Tensor_Mathematics-2005.pdf
13. Храмушин В. Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. *История эволюционного становления корабельного дела, о единении морских инженерных наук и хорошей морской практики*. Lambert Academic Publishing. ISBN-13: 978-613-8-23643-6, 2018. 470 стр.
shipdesign.ru/Khram/History-III.pdf
14. Degtyarev, A., Gankevich, I., Kulabukhova, N., Khramushin, V., Computational model of unsteady hydromechanics of large amplitude Gerstner waves. // EPJ Web Conf., 2020, v.226, 02009, 4p
15. Degtyarev, A., Khramushin, V. First-principles algorithms for ship motion simulation based on ARMA and trochoidal wave models. // Ocean Engineering, 310 (2024) 118395
16. Дегтярев А.Б., Храмушин В.Н. Вычислительные эксперименты в реальном времени, разделение математических моделей с алгоритмами интерактивного управления и визуализации. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2024. Т. 55. № 3. С. 512-518. (english) Real-time simulation, decomposition of mathematical models and algorithms of interactive control and visualization. // Physics of Particles and Nuclei. 2024. v.55. № 3. pp. 313-316.

Оглавление:

| | |
|---|----|
| Предисловие и алгоритмические решения | 2 |
| 1. Особенности цифрового построения геометрической модели корабля..... | 6 |
| 2. Гидростатическая постановка на волну | 8 |
| 3. Влияние присоединённых масс и вязкости воды, демпфирование качки корабля | 12 |
| 4. Корабельное волнообразование и отражение морских волн | 14 |
| 5. Групповые структуры морского трохoidalного волнения | 16 |
| 6. Интерактивное правление курсом и скоростью хода корабля | 20 |
| Заключение | 22 |
| Литература | 25 |

Архив исполняемых модулей программ с подборкой цифровых теоретических чертежей различных кораблей и судов доступны в интернет: ShipDesign.ru/SoftWare/Ship.zip,
руководство к программам Aurora и Hull: ShipDesign.ru/SoftWare/Vessel-action.pdf,
математические модели и алгоритмы: [=//= Vessel-master.pdf](http://Vessel-master.pdf),
вычислительные эксперименты и теория корабля: [=//= Vessel-naviga.pdf](http://Vessel-naviga.pdf),
мореходные эксперименты и проектирование корабля: [=//= Vessel-praxis.pdf](http://Vessel-praxis.pdf).
исходные тексты программ с поддержкой: GitHub.com/Khram-V/Vessel и Khram@mail.ru.