

УДК 532.5

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОДВИЖНЫХ РАСЧЕТНЫХ СЕТОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ НАПОЛНЕНИЯ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА (ГОЛОВНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ)

Липатов Игорь Викторович¹, доктор технических наук, профессор кафедры ВПиГС
e-mail: i_lipatov@mail.ru

Бандин Денис Алексеевич¹, аспирант, ассистент кафедры ВПиГС
e-mail: bandindenis1@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика CFD-моделирования наполнения камеры шлюза с головной системой питания при наличии судна. Использован метод подвижных сеток (overset) в STAR-CCM+ для отслеживания вертикального перемещения судна, определяемого не кинематическим законом, а интегральным инбалансом масс. Описана численная реализация, включающая VOF-модель, модель турбулентности k-ε и алгоритм коррекции осадки. Показано, что учёт инбаланса масс обеспечивает физически корректное воспроизведение уклона свободной поверхности и гидродинамических сил, что важно для оценки безопасности крупнотоннажного флота.

Ключевые слова: судоходный шлюз, головная система питания, подъёмно-опускные ворота, подвижные расчётные сетки (overset mesh), STAR-CCM+, инбаланс масс, гидродинамическая сила, камера гашения.

NUMERICAL IMPLEMENTATION OF THE MOVING GRID METHOD IN SOLVING THE HYDRODYNAMICS PROBLEM OF A NAVIGATION LOCK FILLING (CROWN FILLING SYSTEM)

Igor V. Lipatov¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
e-mail: i-lipatov@mail.ru

Denis A. Bandin¹, Doctoral Student, Assistant
e-mail: bandindenis1@yandex.ru

Abstract. A CFD modeling technique is presented for filling a lock chamber with a head-mounted power supply system in the presence of a vessel. The STAR-CCM+ mobile grid (offset) method is used to track the vertical movement of a vessel, which is determined not by a kinematic law, but by an integral mass imbalance. A numerical implementation is described, including a VOF model, a k-ε turbulence model, and a precipitation correction algorithm. It is shown that taking into account the mass imbalance ensures a physically correct reproduction of the slope of the free surface and hydrodynamic forces, which is important for assessing the safety of a large-tonnage fleet.

Keywords: navigation lock, crown filling system, lifting-and-lowering gate, overset mesh, STAR-CCM+, mass imbalance, hydrodynamic force, energy dissipation chamber (stilling basin).

На внутренних водных путях России преобладают шлюзы с головной системой питания, где вода подаётся через верхнюю голову из-под подъёмно-опускных ворот. Рост водоизмещения судов (коэффициент стеснения камеры достигает 0,8–0,9) приводит к тому, что фактические гидродинамические силы значительно превышают нормативные значения. Традиционные аналитические методы (например, метод Христиановича) не позволяют корректно описать инбаланс масс, возникающий при всплытии судна. Лабораторные модели по критерию Фруда страдают от масштабного эффекта. В связи с этим применяется численное моделирование на основе полных уравнений Навье–Стокса с подвижной сеткой, где вертикальное перемещение судна определяется интегральным инбалансом масс в камере.

Для описания двухфазного течения (вода–воздух) используется метод объёмной доли жидкости (VOF). Решаются осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Турбулентность моделируется стандартной $k - \varepsilon$ моделью (реализация Лаундера–Сполдинга). Плотность и вязкость смеси определяются через VOF-индикатор α :

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a, \mu = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a.$$

Для моделирования вертикального перемещения судна применён метод подвижных сеток (overset). Расчётная область состоит из фоновой сетки (вся камера) и подвижного блока, жёстко связанного с корпусом. На каждом временном шаге происходит интерполяция полей между сетками в зоне перекрытия.

Ключевая особенность – определение движения судна через интегральный инбаланс масс. Условие формулируется так: масса воды, поступившей в камеру, равна массе воды в камере плюс масса, вытесненная судном. На каждом временном шаге реализуется итерационный алгоритм:

1. Расчёт поступившего объёма воды через водопропускное отверстие:

$$V_{in}(t) = \int_0^t Q(\tau) d\tau. \quad (1)$$

2. Вычисление текущего объёма воды в камере из CFD:

$$V_w(t) = \iiint_{\text{камера}} 1 dV. \quad (2)$$

3. Невязка инбаланса:

$$\delta V = V_{in}(t) - V_w(t). \quad (3)$$

4. Коррекция вертикальной координаты судна:

$$\Delta z = \frac{\delta V}{A_{wl}(z)}, \quad (4)$$

где A_{wl} – площадь ватерлинии. Итерации повторяются до сходимости $|\delta V| < 10^{-6} \text{ м}^3$.

5. Перемещение блока сетки на Δz и переход к следующему шагу.

Таким образом, движение судна является следствием инбаланса масс, а не задаётся кинематически.

Расчётная область соответствует типовому шлюзу Волго-Донского канала. Основные элементы: верхний подходной канал, подъёмно-опускные ворота (подвижная граница), камера гашения с гасительным экраном, стенкой падения и балочной решёткой, камера шлюза длиной 310 м. Начальные условия: гидростатическое давление, нулевая скорость, VOF=1 ниже отметки 4 м, VOF=0 выше.



Интегральный уклон свободной поверхности $i(t)$ в камере, определяющий силу на судно ($P_{гд} = i \cdot W$), рассчитывается через закон сохранения импульса:

$$i(t) = \frac{F_{fsx}(t)}{F_{fsy}(t)}, \quad (5)$$

где F_{fsx} — горизонтальная составляющая силы, действующей на поток от стенок и гасительных элементов, F_{fsy} — вес воды в камере. Это даёт интегральную характеристику, согласованную с переданным импульсом.

Расчёты выполнены для двух конфигураций камеры гашения: базовой (существующая решётка из 9 балок) и модифицированной (добавлена вертикальная балка, изменён шаг). На рис. 1 показана динамика вертикальной координаты судна, полученная с использованием алгоритма инбаланса. На начальном этапе ($t < 100$ с) осадка почти не меняется, так как прирост объёма воды компенсируется увеличением глубины под килем. После достижения уровня, при котором вода обтекает скуловой пояс, площадь ватерлинии резко возрастает, и судно активно всплывает — это соответствует физическому инбалансу. При принудительном кинематическом законе (пунктир) эта особенность не воспроизводится.

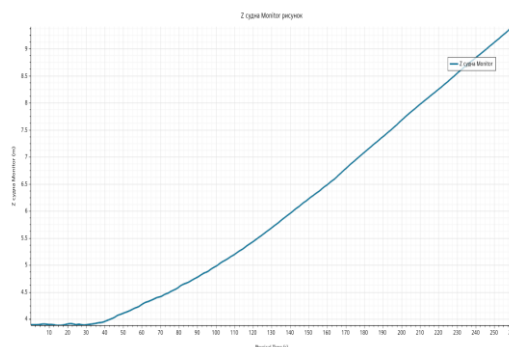


Рисунок 1 – Изменение вертикальной координаты положения судна

На рис. 2 приведён график интегрального уклона $i(t)$ для модифицированной камеры. Видны характерные затухающие пики (прямая и обратная волны). Максимальное значение $i_{\max} \approx 0,005$ при водоизмещении $W = 5000$ т соответствует силе $P_{гд} \approx 25$ тс, что ниже нормативного предела. Для базовой конфигурации амплитуда уклона была на 30–40% выше, что подтверждает эффективность предложенной модернизации.

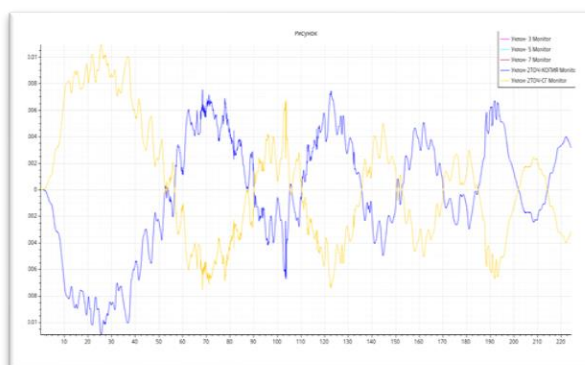


Рисунок 2 – График интегрального уклона $i(t)$

Разработана методика CFD-моделирования процесса наполнения шлюза с головной системой питания, учитывающая реальное вертикальное перемещение судна через интегральный инбаланс масс. Использование метода подвижных сеток в STAR-CCM+ позволило корректно отслеживать изменение осадки и получать физически обоснованные значения гидродинамических сил. Предложенный подход может быть использован для оценки безопасности пропуска крупнотоннажного флота и оптимизации конструкций камер гашения.

Список литературы:

1. Гапеев А.М. Совершенствование эксплуатационных качеств судоходных шлюзов с головной системой питания: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1999. – 278 с.
2. Липатов И.В., Бандин Д.А. Методика оценки эффективности работы каждого элемента камеры гашения шлюза в процессе наполнения // Гидротехнические сооружения водных путей. – 2023. – Вып. 6, ч. 2. – С. 5–10.
3. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 39. – P. 201–225.
4. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1974. – Vol. 3, No. 2. – P. 269–289.
5. Бандин Д.А. Применение метода подвижной сетки (overset mesh) для анализа гидродинамических нагрузок на судно в процессе наполнения шлюзовой камеры // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – Т. 2, № 4(62). – С. 78–85.

