



УДК 656.6

**В.В. Решетникова**, аспирант, кафедра ВП и ГС, ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

## ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КРУПНОТОННАЖНОГО СУДНА И СОСТАВА В СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

*Ключевые слова:* судоходный шлюз, безопасность судоходства, крупнотоннажные суда, стесненные условия, движители, судно, математические модели.

*Изложены особенности математического моделирования движения крупнотоннажного судна и состава в стесненных условиях, основные применяемые расчетные формулы, модели турбулентности. Выявлено, что существующие теории, подходы, математические модели движения судов не учитывают работу движителей. Сделаны выводы о необходимых аспектах при создании математической модели движения крупнотоннажного судна и состава в стесненных условиях с учетом работы движителей.*

Движение судов и составов в стесненных условиях значительно отличается от их движения на свободной воде.

При движении судов по каналу увеличивается сопротивление воды и уменьшается скорость хода; увеличивается динамическая просадка и дифферент на корму; возрастает волнообразование и рыскливость судна; возникают силы присасывания и отталкивания при движении вблизи берегового откоса.

Ярким примером движения судна в стесненных условиях является движение по каналу, процесс входа (выхода) в камеру судоходного шлюза.

Традиционно данные процессы изучались в лабораториях путем масштабного моделирования. На реальных сооружениях данные исследования не выполняются по той простой причине, что это аварийно-опасно и влечет за собой тяжелые последствия (примером этому может послужить, разлив нефти из танков нефтеналивного судна).

В связи с этим представляется целесообразным совершенствовать используемые математические модели для решения задач входа-выхода судов (составов) в камеру судоходного шлюза. В данном направлении было проведено много различных исследований: начиная от моделирования обтекания корпуса судна с использованием уравнений Бернулли, заканчивая интегрированием трехмерной системы уравнений Навье-Стокса. Значимый вклад в исследование взаимодействия системы «судно-шлюзованный участок» вложили такие ученые, как Клементьев А.Н. [1], [2], Тихонов В.И. [3], Горнушкина Т.В., Зернов Д.А., Кирьяков С.С.

Стоит отметить, что стесненные условия воздействуют не только на само судно, но и вызывают повышенные нагрузки на элементы гидротехнических сооружений. Например, при входе судна в камеру шлюза со стороны верхнего бьефа возникает волновая нагрузка на низовые ворота шлюза, а при выходе в верхний бьеф возникает нагрузка на нижние ворота за счет работы движителей. На сегодняшний день вопросы гидродинамического воздействия на ворота судоходного шлюза не изучены.

Для изучения особенностей движения судов в стесненных условиях, а также гидродинамического воздействия на элементы ГТС, предлагается разработать математическую модель движения судна в стесненных условиях.

За основу предлагается взять трехмерную систему уравнений Навье-Стокса, дополненную уравнением неразрывности потока.

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}; \\ \frac{dV_z}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) &= F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}; \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

Для отслеживания свободной поверхности использовать VOF-скаляр. Для дискретизации расчетной области использовать метод контрольного объема.

Традиционно в подобного рода задачах используется k-ε модель, однако для стесненных условий разумнее использовать SST k-ω модель турбулентности. Смысл ее заключается в том, что для пристеночных областей использовать k-ω модель турбулентности, а на удалении от стенок - стандартную k-ε модель. Это позволит достаточно точно моделировать пристеночные течения, значения которых наиболее показательны в стесненных условиях.

Существующие теории, подходы, математические модели движения судов не учитывают работу движителей. Однако в стесненных условиях работа движителей является основополагающим фактором, воздействующим на гидродинамические процессы. Поэтому необходимо обязательно учитывать эту работу.

Прямое моделирование движителя в совокупности с движением судна в стесненных условиях не предоставляется возможным. Научный опыт НИИ Крылова показывает, что даже при отдельном моделировании движителя (гребного винта) на многомиллионных расчетных сетках погрешность результата составляет в лучшем случае 10% от натурных испытаний.

В этой связи, опираясь на диаграммы использования гребных винтов и основываясь на оптимальном распределении Гольштейна, предлагается заменить реальный движитель виртуальным.

Задача движения судна в стесненных условиях является нестационарной с подвижными граничными условиями. Поэтому вопрос используемой расчетной сетки является одним из основных, оказывающих влияние на качество расчета. Наиболее перспективным к использованию являются 2 варианта расчетной сетки: деформируемая расчетная сетка и накладывающиеся расчетные сетки.

Деформируемые расчетные сетки могут использоваться при незначительных изменениях положения судна от начального. Для проверки работоспособности разрабатываемой математической модели было проведено моделирование движения тела на волнах. Телу разрешено 2 степени свободы - вертикальные перемещения и килевая качка.

На основании вышеописанного можно сделать следующие выводы:

– Математическая модель основывается на решении трехмерной системы уравнений Навье-Стокса;

- В данного рода задачах хорошо зарекомендовали себя две гипотезы турбулентности: k-ε и SST k-ω;
- Необходимо обязательно учитывать работу движителей. Наиболее целесообразным является замена движителя его виртуальным аналогом;
- В случае моделирования обтекания состава при его движении по каналу возможно моделирование задачи его обтекания с двумя степенями свободы движения. В данной задаче возможно применение деформируемых расчетных сеток;
- Для моделирования движения судна или состава в расчетной области необходимо применение перекрывающихся расчетных сеток. Данная технология позволяет на каждом временном шаге иметь качественную расчетную сетку. Минусом данной сетки является ее большой размер (много ячеек).

#### **Список литературы:**

- [1] Клементьев А. Н. Математическая модель движения судна в процессе захода в камеру шлюза / А. Н. Клементьев // Сб. тр. ВГАВТ. - Н. Новгород, 1999. – Вып. 291, ч.2.
- [2] Клементьев А.Н. Движение и маневрирование судов при прохождении судопропускных гидротехнических сооружений: дис. д-ра техн. наук: 05.22.16 / А. Н. Клементьев; ВГАВТ. - Н. Новгород, 1998. - 246 с.
- [3] Тихонов В.И. Основы теории динамической системы судно-жидкость: монография / В. И. Тихонов. - Н. Новгород: ВГАВТ, 2007. - 258 с.

### **FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING OF THE MOVEMENT OF LARGE-CAPACITY VESSEL AND COMPOSITION IN CRAMPED CONDITIONS**

*V.V. Reshetnikova*

*Keywords: shipping lock, safety of navigation, large ships, in cramped conditions, the propulsion, the ship, mathematical model.*

*Given the peculiarities of mathematical modeling of traffic of large vessel and convoy in cramped conditions, the main used design equations turbulence model. It is revealed that the existing theories, approaches, mathematical models of vessel traffic do not take into account the work of the propellers. Conclusions about the necessary aspects in the creation of a mathematical model of the movement of large-capacity vessel and composition in cramped conditions, taking into account the work of the propellers.*