

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДЯНОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ на базе ANSYS и Flownex

Пожар на судне представляет серьезную опасность. Он наносит не только значительные материальные убытки, но часто является причиной гибели людей. Поэтому системы пожаротушения на судне являются чрезвычайно важными составляющими его оснащения. При проектировании пожарной системы необходимо учитывать множество факторов: автономность судна, наличие легковоспламеняющихся и горючих материалов в конструкции и проч. Сложная конструкция современных судов и наличие помещений с различными уровнями пожарной опасности требуют тщательного подхода к оборудованию объектов защитными средствами и системами пожарной сигнализации. Выбор и проектирование противопожарной системы на судне проводится с учетом особенностей помещений и назначения самих судов.

Водяные пожарные системы широко используются на судах, так как вода является наиболее легкодоступным огнетушащим средством. Водяная пожарная система состоит из пожарных насосов, трубопроводов, арматуры, пожарных гидрантов и рукавов, контрольно-измерительных приборов. Кроме того, пожарная водяная

система обеспечивает водой и другие системы: водяного орошения, спринклерную, водораспыления, водяных завес и проч. [1] и покрывает все пространство судна, все проходы и помещения, включая машинные отделения и открытые палубы (рис. 1).

Гидравлический расчет водяной системы пожаротушения проводится с целью определения основных параметров проектируемой системы. В ходе гидравлического расчета определяются диаметры распределительных и магистральных трубопроводов, гидравлические параметры оросителей и насадок, объемы пожарных резервуаров и проч. Результаты гидравлических расчетов используются для выбора и определения показателей работы пожарных насосов с учетом различных схем подключения (параллельно/последовательно).

В настоящее время для ускорения проведения гидравлических расчетов используется специализированное программное обеспечение, позволяющее рассчитывать конфигурацию гидравлической системы любой степени сложности, а также прорисовывать трубопроводную систему в графическом интерфейсе. Однако любые подобные системы обычно сфокусированы на ре-

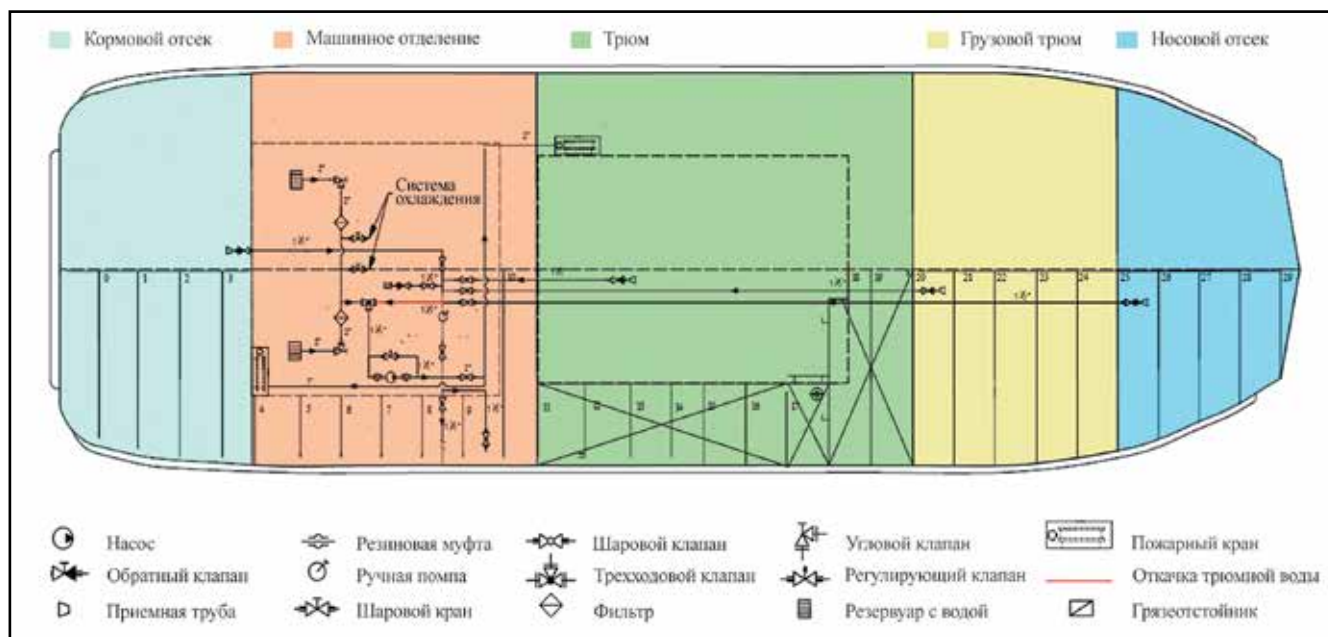


Рис. 1. Структурная схема водяной пожарной системы судна

шении ограниченного набора задач и имеют ограниченные возможности по интеграции со сторонними приложениями. Вместе с тем для судостроения актуальной является задача построения комплексной модели всех основных судовых трубопроводов, систем и подсистем, включая системы энергоустановок.

Построение комплексной цифровой модели судовых систем является чрезвычайно сложной задачей как в методическом плане, так и с точки зрения реализации технологий совместного 1D/2D- и 3D-моделирования различных технических систем судна. Такой подход требует организации обмена данными

между несколькими системами компьютерного моделирования и инженерного анализа, образующими единую программную среду.

Для организации эффективного обмена данными между различными приложениями и выполнения совместных расчетов удобнее использовать единый платформенно-независимый интерфейс (Functional Mock-up Interface, FMI), разработанный для переноса так называемых функциональных моделей (Functional Mock-up Unit, FMU) из одной среды имитационного моделирования в другую, а также для организации совместных вычислительных экспериментов с использованием мультивендорных CAE-систем.

Стандарт FMI начал разрабатываться в 2008 году в рамках проекта MODELISAR (Daimler AG и др.), и в настоящее время поддерживается более 100 различными компьютерными системами инженерного анализа и системного/имитационного моделирования, такими, например, как ANSYS CFD, ANSYS DesignXplorer, Dymola, FloMaster, Flownex, MATLAB Simulink и многими другими.

Компанией КАДФЕМ была разработана и верифицирована методика создания ROM-модели (Reduced Order Model – модель пониженного порядка) шарового крана на основе результатов серии параметрических гидравлических расчетов шарового крана и построения поверхности отклика для последующего использования ROM-модели в виде FMU-блока в глобальной системной модели водяной пожарной системы судна (рис. 2). Кроме того, было проведено исследование возможности двустороннего сопряжения (co-simulation) системного теплогидравлического

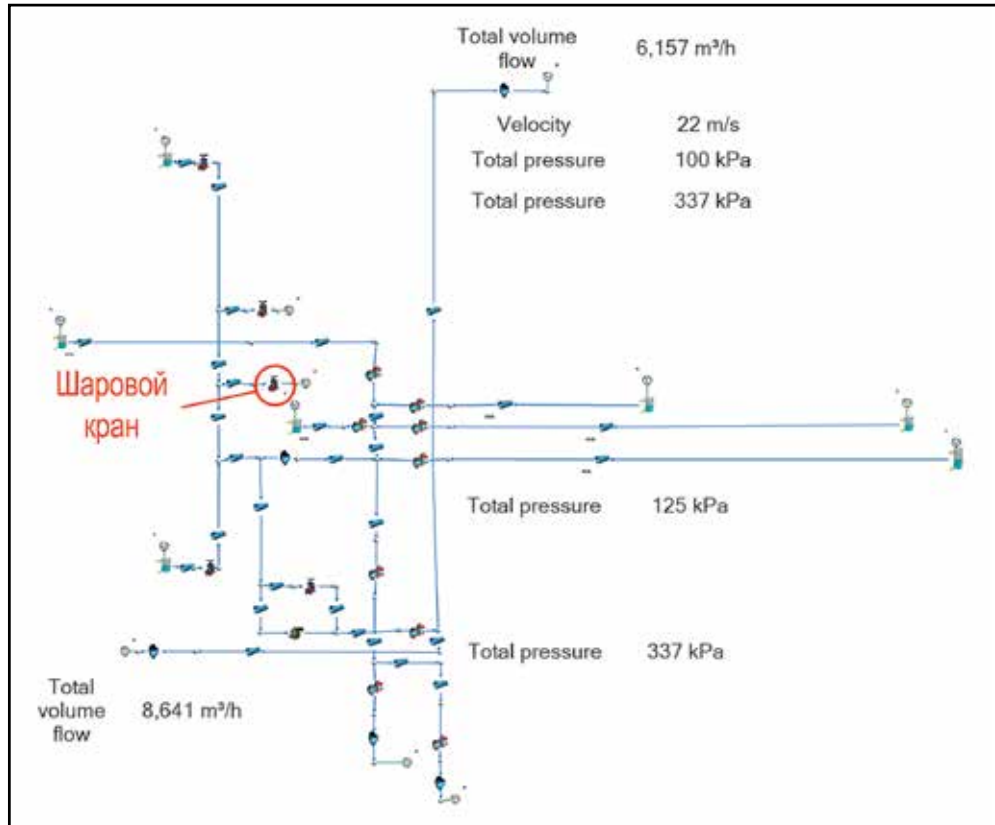


Рис. 2. Системная модель водяной судовой системы пожаротушения в Flownex

кода Flownex с газодинамическими решателями ANSYS CFX/Fluent.

Объект моделирования и исходные данные

Шаровые краны широко используются во многих трубопроводных системах судна – они достаточно универсальны и применяются как в качестве запорной, так и регулирующей арматуры. Шаровые краны имеют малое гидравлическое сопротивление и просты в эксплуатации. Однако существуют такие условия эксплуатации, когда их применение ограничено из-за невозможности обеспечения требуемого уровня безопасности. Например, использование шарового крана в условиях длительного дросселирования при большом перепаде давления часто приводит к появлению вибраций, кавитации и разрушению элементов конструкции арматуры.

Основной гидравлической характеристикой любой трубопроводной арматуры является коэффициент гидравлического сопротивления ξ (КС), который характеризует совершенство формы проточной части арматуры. Чем меньше гидравлическое сопротивление трубопроводной арматуры, тем меньше потери давления в арматуре и ниже интенсивность вихреобразования, влияющая на ее акустические характеристики. Поэтому для снижения уровня шума и вибраций трубопроводной арматуры необходимо понимать закономерности образования именно гидродинамического источника шума и вибраций [2]. Также большое значение имеют исследования влияния кавитации на шум и вибрацию.

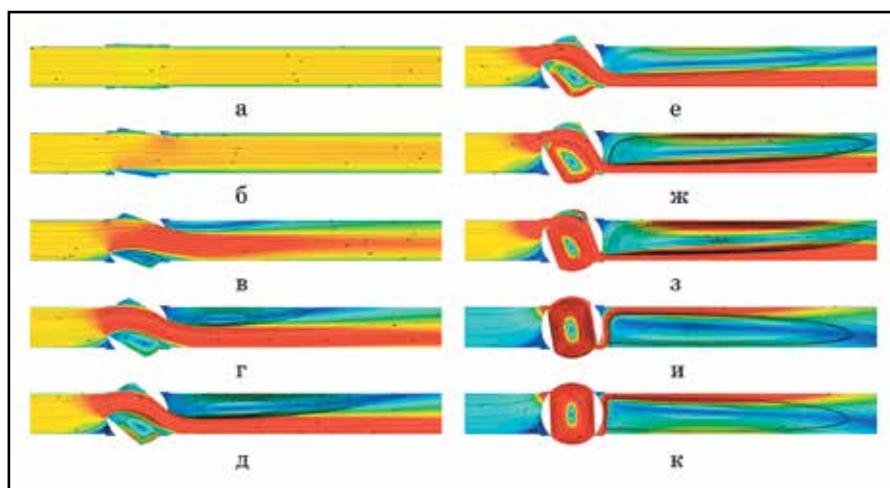


Рис. 3. Поле скорости потока и линии тока при разных углах поворота запорного элемента (а-е)

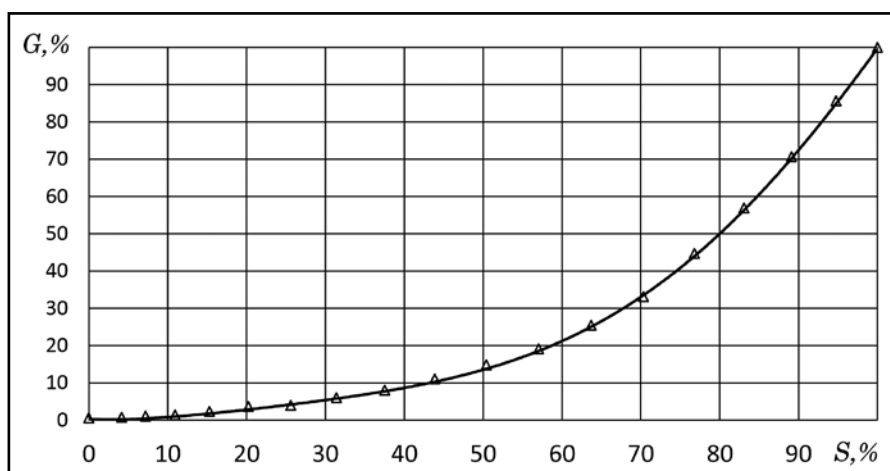


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная зависимости КС шарового крана от хода запорного элемента

В схеме водяной пожарной системы судна, представленной на рис. 1, используется шаровой кран 546 PVC-U, разработанный компанией GF Piping Systems для работы с пластиковыми системами трубопроводов. Сегодня пластиковые трубопроводы (полипропиленовые и ПВХ) широко используются в современных системах пожаротушения. Основное преимущество пластикового трубопровода состоит в том, что его монтаж можно производить в труднодоступных местах.

Исходные данные для гидродинамического расчета:

- ▶ условный диаметр $DN = 40$ мм;
- ▶ плотность воды $\rho = 998$ кг/м³;
- ▶ температура воды $T = 20^\circ\text{C}$;
- ▶ расход воды $G = 0,1 \div 35$ кг/с.

Для получения данных о гидравлических характеристиках шарового крана была выполнена серия стационарных расчетов для разных углов поворота запорного элемента (шара). В рассматриваемой задаче течение является строго турбулентным, поэтому при постановке задачи численного моделирования необходимо выбрать рациональный подход к моделированию турбулентности. В соответствии с ГОСТ Р 55508 [3] для любого типа арматуры при $DN \leq 250$ для всех значений хода запорного/регулирующего элемента при числах Рейнольдса более $2 \cdot 10^4$ наступает область квадратичного сопротивления, в которой гидравлическое сопротивление ар-

матуры практически не зависит от числа Рейнольдса.

Математические модели и результаты расчета КС шарового крана

Геометрическая модель расчетной области состояла из входного прямолинейного участка длиной в $20 \times DN$, проточной части шарового крана и выходного участка длиной $10 \times DN$. Задача решалась в симметричной постановке, в стационарных расчетах была применена SST k- ω -модель турбулентности.

При использовании двухпараметрических моделей турбулентности в газодинамическом решателе ANSYS Fluent на входной границе требуется дополнительно задавать две величины, характеризующие турбулентность потока жидкости. В данном случае – это интенсивность турбулентности $Tu = 5\%$ и гидравлический диаметр $d = DN$. В задаче использовался сопряженный решатель по давлению Pressure-Based Coupled Solver.

Результаты расчета КС шарового крана 546 хорошо согласуются со справочными данными [4] и представлены на рис. 3, 4. Поскольку в

техническом паспорте шарового крана 546 гидравлическая характеристика приводится в виде зависимости $G = f(S)$, при обработке результатов моделирования полученная характеристика КС $\xi = f(S)$ была приведена к соответствующему виду.

В целом можно отметить, что с ростом угла поворота шара (при уменьшении проходного сечения крана) существенно увеличивается неравномерность потока, интенсифицируется вихреобразование и, соответственно, увеличивается гидравлическое сопротивление арматуры, что обусловлено взаимодействием высокоскоростной струи потока с элементами конструкции арматуры и трубопровода.

Полученные результаты многовариантного численного расчета используются для нахождения функции отклика – функциональной модели, которая является упрощенной моделью поведения шарового крана и используется в виде FMU-блока в системной модели для непосредственного определения перепада давления на арматуре при известных (рассчитанных) значениях коэффициента гидравлического сопротивления и средней скорости потока в сечении трубопровода перед арматурой.

Используя полученное уравнение функции отклика, можно построить поверхность отклика в трехмерной системе координат и проанализировать изменение выход-

ного параметра (коэффициента гидравлического сопротивления) в зависимости от выбранного переменного фактора (угла поворота/хода и располагаемого перепада давления).

Расчет кавитационной характеристики арматуры

В настоящее время при проектировании трубопроводной арматуры реализуются различные мероприятия, направленные на обеспечение бескавитационного течения среды в судовых трубопроводах. Однако, как показывает практика, длительное время работы арматуры на режиме дросселирования негативно сказывается на ее функциональном состоянии, поскольку в проточной части арматуры формируются высокоскоростные струи, приводящие к появлению кавитации в проходном сечении арматуры. При этом кавитация вызывает вибрацию, увеличение уровня шума (часть кавитационной энергии излучается в акустической форме), снижение коэффициента расхода и разрушение внутренних частей арматуры. Поэтому разрабатываемая ROM-модель запорной арматуры должна также включать кавитационную характеристику (зависимость коэффициента кавитации от хода или относительной пропускной способности).

Определение зависимости коэффициента кавитации K_c от хода h необходимо для того, чтобы рассчитать допустимый перепад давления, при котором наступает кавитация.

Расчет кавитационной характеристики шарового крана 546 проводился в трехмерной постановке. Интенсивность турбулентности в потоке на входе принималась равной 0,05 (5%). Использовалась модель кавитации Zwart et al. [5] с предварительно откалиброванными константами модели кавитации. Для моделирования турбулентности использовалась стандартная модель SST $k-\omega$. Значения коэффициентов кавитации K_c изменялись за счет изменения статического давления на выходе из расчетной области. Расчеты были выполнены для углов поворота запорного элемента в диапазоне от 30 до 90° (90° соответствует полному перекрытию проходного сечения).

Расчетная кавитационная характеристика шарового крана показана на рис. 5. Бескавитационным режимам течения соответствуют числа кавитации $K_c \ll 1$, число кавитации $K_c \sim 1$ соответствует начальной стадии

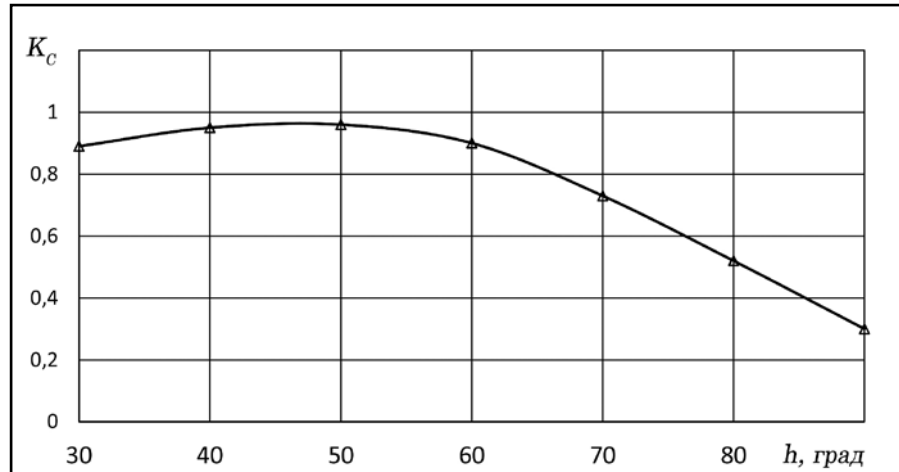


Рис. 5. Кавитационная характеристика шарового крана

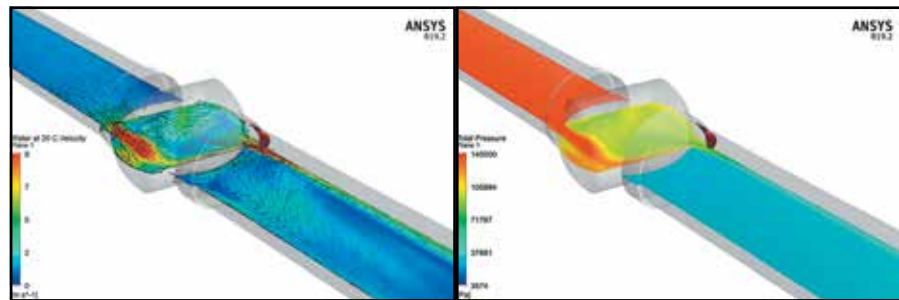


Рис. 6. Начальная стадия развития кавитации в шаровом кране 546 (поле скоростей и поле абсолютного давления)

развития кавитации в шаровом кране (рис. 6), числа кавитации $K_c \gg 1$ соответствуют режиму развитой кавитации.

Рассмотренный подход к построению ROM-моделей элементов гидравлических сетей является универсальным и может быть использован при создании комплексных цифровых моделей судовых систем.

Д. П. Хитрых,
АО "КАДФЕМ Си-Ай-Эс"

Литература

1. Радзиевский С. И., Хнычкин В. М. Пожаробезопасность и противопожарная защита кораблей. – Л.: Судостроение, 1987.
2. Куличкова Е. А. Снижение импульсной вибрации судовой трубопроводной арматуры: дисс. кандидата технических наук: 1.04.06 / ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2017.
3. ГОСТ Р 55508-2013. Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик. – введ. 2013-08-20. – М.: Стандартинформ, 2014.
4. Технический паспорт. Шаровой кран тип 546 PVC-U. Годен с 11.08.17.
5. Zwart P. J., Gerber A. G, Belamri T. A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics // ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow. – Yokohama, Japan, 2004. – Paper No.152. – 11 pages.