

КОМПОНЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ КОМПАНИИ ТРАНЗАС

С. В. Тарасов, Д. В. Лебедев, И. А. Николаев (Санкт-Петербург)

1. Введение

Статья посвящена опыту разработки математических моделей для семейства тренажеров грузобалластных и технологических операций «TechSim/LCHS 5000» компании Транзас (http://www.transas.com/products/simulators/sim_products/cargo/lchs/).

Тренажеры данного типа служат для изучения устройства танкера, состава его технических средств и систем, а также обеспечивают обучение управлению системами и агрегатами, правильному выполнению технологических операций, навыкам принятия грамотных решений в нормальных и аварийных эксплуатационных условиях.

Для решения указанных задач, тренажер должен обеспечивать возможность работы с различными судовыми системами, задействованными в технологическом цикле функционирования танкера, а в также аварийных ситуациях. В частности следует отметить такие системы, как балластная, грузовая, зачистки танков, мойки танков, подогрева груза, инертных газов, пожаротушения, управления сбросами, обнаружения утечки газа, аварийной сигнализации и прочие.

Ключевую роль в создании тренажера грузобалластных операций играет разработка математической модели, удовлетворяющей следующим требованиям:

- математическая модель должна достоверно воспроизводить физические процессы, происходящие одновременно в различных судовых системах во взаимодействии с окружающей средой. При этом должно быть обеспечено интерактивное взаимодействие пользователя со всем оборудованием, входящим в состав моделируемых систем, то есть сотнями клапанов и труб и десятками более сложных специализированных устройств;
- производительность математической модели должна быть достаточна для работы на стандартном ПК как в режиме реального, так и ускоренного времени. Причем продолжительность типичных операций такова, что для обеспечения приемлемых сроков обучения необходима возможность ускорения времени в 25 раз;
- архитектура математической модели должна быть легко масштабируемой и допускать модификацию состава систем и конфигурации каждой системы при минимальных трудозатратах.

Глубина математического моделирования физических процессов, минимально необходимая для тренажера, определяется исходя из анализа технической и эксплуатационной документации танкеров, требований стандартных курсов и учебных программ нефтегазовых компаний.

Большинство судовых систем, входящих в состав грузобалластного тренажера, представляют собой разветвленные трубопроводы. Процессы, происходящие в таких системах при нормальных эксплуатационных условиях, допускают моделирование в виде гидравлической сети. При этом течения в трубах описываются одномерным квазистационарным потоком вязкой, несжимаемой, двухфазной многокомпонентной жидкости. Для танков и резервуаров необходимо моделировать массо- и теплообмен, компонентный состав, фазовый переход, а также вертикальную конвекцию в пределах жидкой и газообразной сред.

Принимая во внимание требования к программной реализации, приведенные выше, можно сделать вывод о том, что моделирование подобных систем является достаточно сложной задачей и требует особого подхода.

2. Компонентный подход

Компонентное моделирование предполагает, что описание моделируемой системы, отражающее ее естественную структуру, составляется из готовых компонентов, а совокупная математическая модель формируется исполняющей системой автоматически. Современное компонентное моделирование является объектно-ориентированным [3]. В рамках этого подхода проводится объектно-ориентированный анализ прикладной области, на основании которого выделяются типовые классы и отношения наследования между ними, что позволяет сформировать библиотеку типовых компонентов.

В качестве средства разработки математических моделей для семейства тренажеров «TechSim/LCHS 5000», используется среда моделирования «Model Vision Studium» (<http://www.mvstudium.com>), представляющая собой специальную версию коммерческого продукта «Rand Model Designer» (<http://www.rand-service.com/ru/>). Указанная среда моделирования применяется как для создания библиотеки типовых компонентов, так и для разработки моделей конкретных систем тренажера.

Библиотека типовых компонентов [1, 2], созданная в процессе разработки семейства тренажеров «TechSim/LCHS 5000», содержит несколько десятков различных классов устройств, задействованных в судовых системах, в том числе:

- емкости для жидкости и газа (танки, воздушные резервуары);
- элементы трубопроводов (трубы и арматура);
- насосы и компрессоры;
- теплотехнические устройства (теплообменники, испарители);
- управляющие устройства (регуляторы и логические схемы).

Библиотека имеет иерархическую структуру, построенную на основе механизмов наследования и вложенности, что облегчает поддержку и добавление новых классов. Основные решения, примененные при построении библиотеки, такие как структура карт поведений и систем уравнений типовых классов, описаны в предыдущих работах авторов по данной тематике [1, 2].

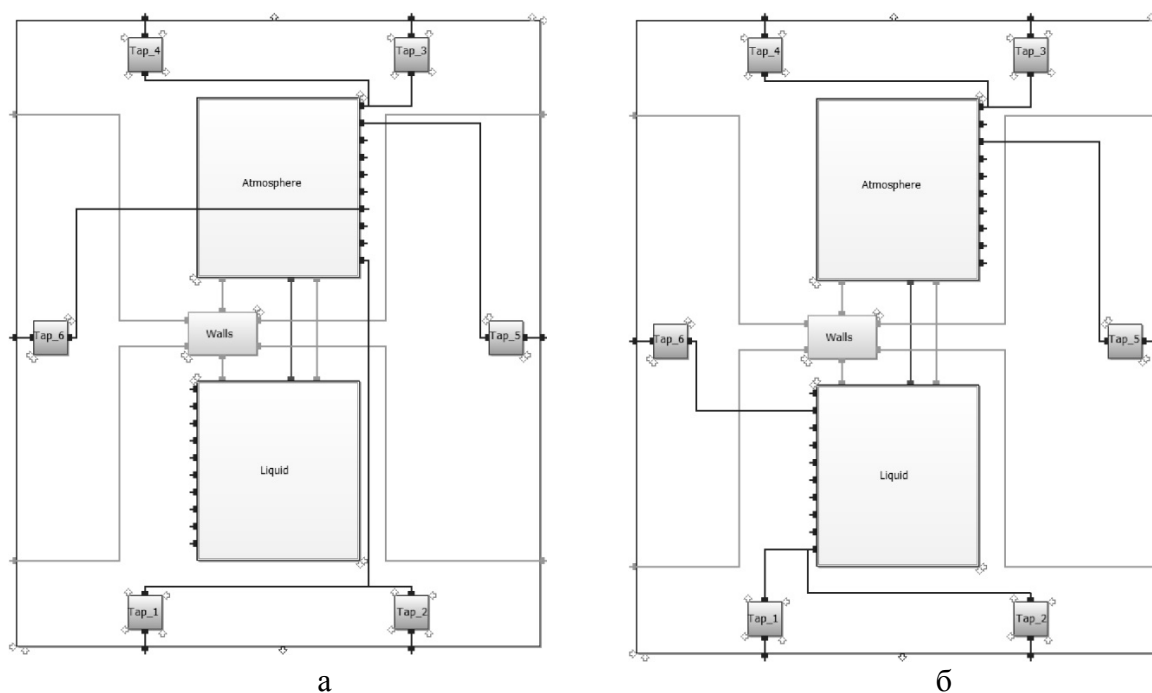


Рисунок 1. Динамические связи в структурной схеме типового класса «Tank». Состояния пустого (а) и частично заполненного (б) танка

Отдельно рассмотрим применение компонентного подхода для моделирования границы раздела фаз в танке. Структурная схема типового класса «Tank» (рис. 1) содержит локальные объекты «Liquid» (жидкая среда) и «Atmosphere» (газообразная среда), соединенные связями, при помощи которых осуществляется тепло- и массообмен между фазами. Соединение танка с подключенными к нему трубопроводами моделируется при помощи объектов «Tap», каждый из которых при помощи динамической связи подключается либо к объекту «Liquid», либо к объекту «Atmosphere», в зависимости от расположения границы раздела фаз (рис. 1).

Модель каждой системы формируется разработчиком в виде структурной схемы, состоящей из объектов, соединенных связями. В качестве примера рассмотрим грузовую систему танкера-газовоза из состава тренажера «LNG Membrane Tanker». Структурная схема модели данной системы (рис. 2) содержит пять экземпляров класса «CargoTank», представляющего собой структурную схему из самого танка, его насосов и клапанов (рис. 3).

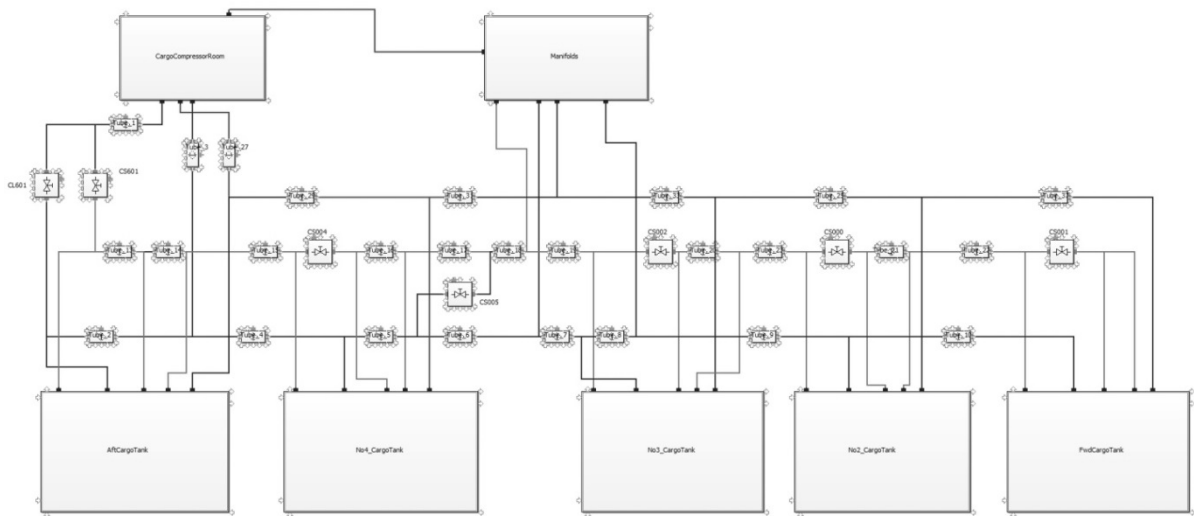


Рисунок 2. Структурная схема модели грузовой системы танкера-газовоза

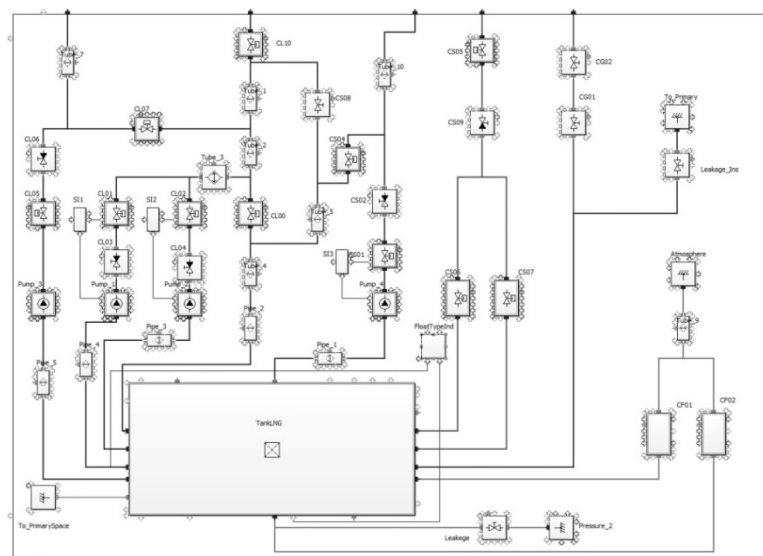


Рисунок 3. Структурная схема класса «CargoTank», являющегося фрагментом грузовой системы танкера-газовоза

3. Работа модели в тренажере

Программный код модели («выполняемая модель»), в виде динамических библиотек, генерируется по ее описанию на языке моделирования при помощи среды «Model Vision Studium». Выполняемая модель включает в себя все компоненты модели (в том числе неявные объекты, такие как связи), исполняющую систему и библиотеку численных методов.

Во время работы тренажера исполняющая система отслеживает переключения состояний всех объектов в соответствии с их картами поведения, автоматически формирует из уравнений активных состояний объектов и уравнений связей между объектами совокупную систему уравнений модели, и осуществляет ее численное решение. Автоматическая генерация программного кода, позволяющая исключить ошибки программирования на этапе при создании моделей систем, в то же время обуславливает повышенные требования к качеству типовых библиотечных классов, а также к надежности и быстродействию исполняющей системы.

Как показал опыт, наиболее критичным для тренажерных приложений оказалось требование работы автоматически сгенерированных моделей в реальном времени. В грузобалластном тренажере обновление контролируемых переменных всех моделируемых систем должно происходить с шагом порядка 0,5 с реального времени, вследствие чего время расчета одного шага для каждой системы не должно превышать десятых долей секунды.

Для иллюстрации данного вопроса в таблице 1 приведены замеры параметров модели грузовой системы танкера-газовоза из состава тренажера «LNG Membrane Tanker» семейства «TechSim/LCHS 5000» при выполнении типовых операций.

Таблица 1

Параметры работы математической модели грузовой системы танкера-газовоза в составе тренажера

Моделируемая технологическая операция	Захолаживание грузовых танков	Заполнение грузовых танков
Число клапанов, открываемых при выполнении операции	34	43
Общее число выражений в совокупной системе уравнений до преобразования	14512	14790
Число нелинейных алгебраических уравнений	309	318
Число линейных алгебраических уравнений	981	1504
Время расчета одного шага модельного времени	0,125 с	0,144 с

Как видно из таблицы, совокупная система уравнений модели до преобразований содержит десятки тысяч выражений, что исключает возможность ее непосредственного численного решения в реальном времени. Исполняющая система осуществляет сортировку уравнений, выделяя алгебраические циклы и последовательности формул, а также выявляя возможности для автоматического преобразования системы.

Это позволяет сократить число алгебраических уравнений, решаемых при помощи численного метода, до приемлемых величин, однако порождает дополнительные затраты времени на автоматический анализ и преобразование системы. Для сокращения указанных затрат, исполняющая система использует дополнительную информацию об

уравнениях, формулируемую разработчиком модели на этапе создания библиотечных компонентов:

- явное указание алгебраических уравнений, заведомо являющихся линейными;
- явное указание деления системы уравнений на «блоки», решаемые последовательно;
- явное указание переменных, которые заведомо являются искомыми, либо заведомо не могут быть искомыми.

Перечисленные меры позволили добиться требуемого быстродействия, что подтверждается данными таблицы 1.

Верификация разработанных математических моделей, как правило, осуществляется путем сравнения графиков контролируемых параметров судовых систем, построенных при выполнении типовых операций на тренажере, с аналогичными данными реальных судов (рис. 4).

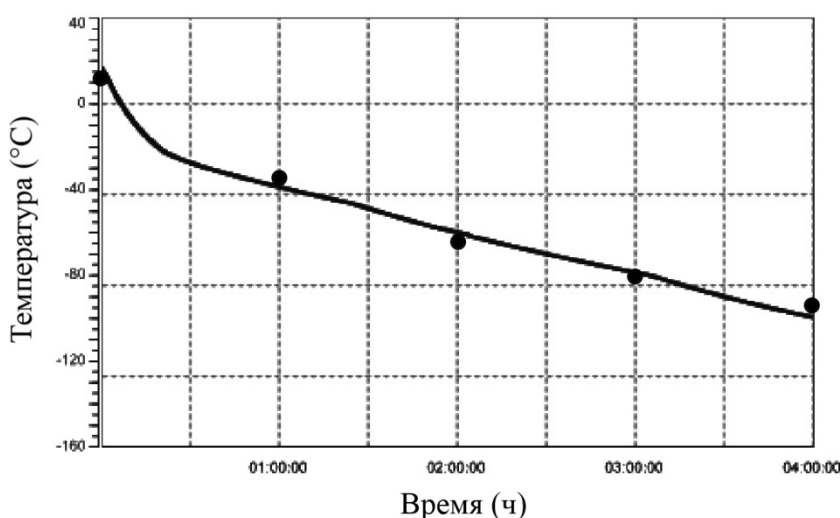


Рисунок 4. Зависимость средней температуры в грузовом танке от времени при выполнении операции захлаживания на танкере-газовозе. Сравнение результатов, полученных при работе тренажера (кривая) и данных судна прототипа (точки)

Литература

1. **Tarasov S.V., Kiptily, D.V., Lebedev D.V.** An object-oriented approach to the development of liquid cargo handling simulators in TRANSAS / Proceedings of 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling. IFAC-PapersOnLine, Mathematical Modeling Vol. 7, P. 369-373, doi: 10.3182/20120215-3-AT-3016.00065.
2. **Киптиль Д.В., Колесов Ю.Б., Лебедев Д.В., Сениченков Ю.Б., Тарасов С.В.,** Объектно-ориентированный подход к разработке тренажера грузовых операций на море / Международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС 2011» Труды конференции. Санкт-Петербург: ОАО «ЦТСС», 2011, С. 70-76.
3. **Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.** Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход. С.-Петербург. БХВ. 2006.