

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В СУДОВЫХ ТАНКАХ

Павловский В.А., Скуднев С.А., Топаж А.Г. (Санкт-Петербург)

Введение

Одной из актуальных проблем транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) судами-газовозами, равно как и судами вспомогательного флота (бункеровщиками) является задача его безопасного хранения и поддержания основных физических характеристик (температура, давление) в допустимых пределах с одновременной минимизацией непроизводительных потерь перевозимого груза. Для случая СПГ эта задача усложняется необходимостью поддержания всей или большей его части в жидком состоянии, что возможно лишь при очень низких температурах (111 К), и при условии того, что полная теплоизоляция танка от окружающей среды в реальных условиях никогда не достигается. При этом для поддержания рабочего режима транспортировки оказывается необходимым использовать специальные технологические приемы (сброс излишка давления при достижении им критических величин) или технические средства (установки повторного сжижения газа). Построение и исследование адекватной математической модели термодинамики СПГ при его транспортировке в судовых танках составляет тему представленного доклада.

Материалы и методы

Математическим ядром построенной модели выступает система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая основные термодинамические процессы и фазовые переходы СПГ, осуществляющего постоянный теплообмен с окружающей средой. Важным допущением, принятым при построении модели служит тезис о том, что в каждый момент времени система полагается находящейся в состоянии термодинамического равновесия, то есть с одновременным наличием в танке в состоянии насыщения как жидкой, так и паровой фазы.

Состояние насыщения определяется температурой насыщения T_H , которая ниже критической температуры T_K . Этой температуре T_H соответствует свое давление насыщения P_H . При выводе системы из состояния насыщения, когда температура какой-либо фазы становится отличной от температуры T_H , нарушается баланс равновесия между фазами. Для восстановления такого баланса термодинамическая система переходит в новое состояние насыщения, с новыми значениями температуры T_H и давления P_H . Этот переход осуществляется за счет механизмов испарения и конденсации. При поступлении теплоты к жидкости, находившейся в состоянии насыщения, эта теплота отбирается за счет испарения и передачи ее паровой фазе. Масса жидкой фазы при этом уменьшается, а паровой – увеличивается. Устанавливается новое состояние насыщения с несколько большими значениями обеих характеристик состояния (T_H ; P_H). Если же температура паровой фазы оказывается большей, нежели температура жидкости, то для перехода в новое состояние насыщения теплота паровой фазы передается жидкости за счет механизма конденсации. Масса паровой фазы в этом случае уменьшается, а жидкой – увеличивается.

Наряду с плавными изменениями величин параметров состояния, обусловленными постоянно текущим процессом теплообмена с окружающей средой, в технологической системе перевозки СПГ периодически имеют место разовые пиковые внешние интервенции, практически одномоментно выводящие систему из состояния

равновесия – сброс излишка давления, разовое поступление порции жидкого газа из установки повторного сжижения, бункеровка и т.д. Эти случаи отображаются в построенной модели в форме разовых мгновенных событий, изменяющих вектор отслеживаемых характеристик состояния (компарментов динамической модели). При этом используется явное аналитическое решение соответствующих уравнений теплового баланса.

Так, при заполнении объема танка жидкостью с температурой $T_1^0 = 111\text{K}$ смысл уравнения теплового баланса заключается в равенстве суммарной теплоты, поступающей через изоляцию от внешней среды и отбираемой за счет поступления холодной жидкости с массовым расходом C_T (кг/с), и теплоты, идущей на охлаждение металлоконструкций массой M^0 , металлоконструкций танка M_1^0 и паровой фазы массой M_2^0 . Математическая формализация такого уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k \cdot T_a \cdot F + C_T \cdot C_1 \cdot T_1^0 - (k \cdot F + C_1^0 \cdot C_T) \cdot T}{C},$$

где T – температура в объеме танка (К), t — время (сек.), k – коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$) от окружающей среды, имеющей температуру T_a , F – площадь поверхности танка (м^2), C_1^0 – теплоемкость СПГ в жидкой фазе ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$) при температуре T_1 . Величина C в этом уравнении характеризует теплоту, воспринимаемую металлоконструкциями, жидкостью и газом с теплоемкостями C_0 , C_1 и C_2 , соответственно при изменении температуры на 1К:

$$C = C_0 \cdot M^0 + C_1 \cdot M_1^0 + C_2 \cdot M_2^0 \quad ,$$

Интегрирование этого обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка выполняется при начальном условии:

$$T = T_0|_{t=0} \quad ,$$

где T_0 – начальная температура внутри танка (К).

В рамках разработанной имитационной системы моделируются следующие базовые физические процессы:

1) Теплообмен содержащегося в танке СПГ с окружающей средой.

Математически теплообмен между содержащейся в танке двухфазной средой в состоянии насыщения с температурой T и окружающей средой с температурой T_a описывается уравнением теплопередачи:

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot (T_a - T) \cdot F$$

где Q — поступающая теплота (Дж), t , время (сек), k – коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$), значение которого при наличии изоляции определяется ее коэффициентом теплопроводности и толщиной изолирующего слоя, то есть конструктивными решениями.

Отдельно вычисляются тепловые потоки от внешней среды в жидкую и газообразную фазы. Температура окружающей среды (приземного слоя воздуха) рассматривается как внешний управляющий параметр, который может изменяться непосредственно в ходе расчета как в автоматическом режиме (поступление

фактических или модельных измерений), так и задаваться интерактивно в пользовательском интерфейсе приложения.

2) Теплообмен между находящимися при разной температуре жидкостью и газом через границу раздела (зеркало поверхности жидкой фазы СПГ), который подчиняется уравнению Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3 ,$$

где q – интенсивность теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$), α – коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$), T_1 и T_2 – температуры жидкой и газовой фаз соответственно, F_3 – площадь поверхности раздела - зеркала поверхности жидкой фазы (м^2).

3) Фазовые переходы между агрегатными состояниями (испарение жидкости и конденсация газа), приводящие к изменению давления газовой подушки над жидкой поверхностью и, соответственно, к изменению термодинамических показателей и параметров (температура кипения, теплоемкость и т. д.). При поступлении теплоты к жидкой фазе для перехода в новое состояние насыщения происходит испарение жидкости, у нее отбирается теплота. Этот процесс испарения описывается соотношением:

$$dM = dQ/r ,$$

где dM — приращение массы (кг) паровой фазы при поступлении теплоты dQ (Дж) к жидкой фазе в состоянии насыщения, r – теплота парообразования (Дж/кг), которая является функцией температуры насыщения (и, тем самым, давления насыщения). При поступлении теплоты к паровой фазе или наличии недогретой жидкости для достижения состояния насыщения происходит конденсация паров – жидкость воспринимает теплоту газовой фазы. Этот процесс конденсации описывается уравнением теплового баланса между переданной от пара и воспринятой жидкостью теплотой:

$$\alpha \cdot (T_2 - T_1) \cdot F_3 \cdot dt = C_T \cdot di ,$$

где C_T – масса выпавшего конденсата, di – изменение энтальпии по отношению к энтальпии насыщения.

Использование приведенных соотношений позволяет реализовать в модели алгоритмы разового (одномоментного) пересчета характеристик вектора состояния при скачкообразном изменении температур и/или масс твердой и жидкой фаз, что соответствует фактам бункеровки, сброса давления путем отбора пара, возврата охлажденной жидкости из установки повторного сжижения и т.д. При этом используется предположение о динамической жесткости системы (времена переходных процессов выравнивания температур в слоях жидкой фазы и возвращения системы к равновесному насыщенному состоянию при скачкообразном изменении условий полагаются малыми по сравнению с динамикой фонового процесса теплообмена с окружающей средой. Таким образом, в модели реализованы описания следующего перечня простейших технологических операций, осуществляемых в декларативном или автоматическом (при достижении какого-либо условия) режимах:

1) Отбор заданной порции испарившегося газа и его поступление в установку повторного сжижения

2) Возврат жидкости из установки повторного сжижения (УПСГ) обратно в емкость танка через некоторое время, определяемое модельным параметром «производительность УПСГ».

3) Сброс давления газа при достижении им критической величины и невозможности использования установки повторного сжижения (в силу ее отсутствия или полной загрузки в настоящий момент). Сброс давления производится уменьшением доли массы газа (аналог его сжигания или выпуска в атмосферу) и интерпретируется в системе как безвозвратные непроизводительные потери перевозимого груза.

Реализация модели

Внутренняя математическая логика разработанной модели представляет собой пример применения классического системно-динамического подхода (интегрирование дифференциальных уравнений в непрерывном времени). Вместе с тем, в ней присутствуют элементы дискретно-событийной методологии - мгновенные переходы между состояниями, управляемые системными событиями. Кроме того, модель содержит агрегированные, но сравнительно изолированные специальные компоненты или модули, поведение и логика функционирования которых могут быть описаны сравнительно независимо (например, установка повторного сжижения газа), используя традиционные методы теории конечных автоматов. Иными словами, построенная модель также обладает чертами мультиагентной системы, то есть может быть отнесена к классу гибридных моделей. Выказанные соображения обуславливают сделанный авторами выбор в качестве инструмента разработки универсальной среды многоподходного имитационного моделирования AnyLogic, которая поддерживает все три перечисленных выше парадигмы. В результате, физический образ конечного программного продукта представляет собой кроссплатформенное приложение - исполняемый jar-архив, запускаемый посредством предустановленной на персональном компьютере виртуальной машины Java.

Используя вынесенные в пользовательский интерфейс элементы управления, пользователь получает возможность задавать следующие характеристики:

1) Конструктивные параметры танка (общая площадь и площадь смоченной поверхности танка, площадь поперечного сечения на уровне границы раздела твердой и жидкой фаз в рабочем режиме, теплопроводность стенок танка и интегральный параметр дополнительной теплоизоляции)

2) Начальные условия (температура окружающей среды, температура жидкости, объем и массу газа в подушке над жидкой поверхностью, масса жидкой фазы)

3) Параметры технологического режима транспортировки/хранения (критическое давление, при достижении которого следует осуществлять отбор газа в УСПГ или его выброс за пределы системы, массу газа, отбираемую за один такт, факт наличия установки повторного сжижения и, при условии наличия – ее базовые характеристики: производительность, температура и плотность конечного продукта, энергоемкость (в терминах коэффициента потерь СПГ – доли перерабатываемого газа идущей на обслуживание функционирования самой установки)

4) Служебные установки расчета (длительность вычислительного эксперимента в единицах модельного времени, временной шаг интегрирования динамических уравнений, параметры журналирования результатов в динамическом режиме и т.д.).

Визуализация процесса расчета осуществляется непосредственно на потоковых диаграммах Форрестера, с помощью серии анимированных диаграмм («состояние танка», «загрузка УПСГ» и др.), а также с использованием ряда простейших

графических представлений (графиков и диаграмм), отражающих текущую статистику отслеживаемых характеристик системы.

Выводы

Разработанная модель термодинамики двухфазного состояния СПГ при его транспортировке в судовых танках может быть исследована как в рамках простейших одновариантных вычислительных экспериментов, так и использоваться в качестве алгоритмического ядра многофакторных или оптимизационных экспериментов в задачах поддержки проектных и эксплуатационных решений. Так, с ее помощью авторами работы были поставлены и решались следующие задачи:

- Обоснование критических значений давления для системы автоматического стравливания излишков перевозимого СПГ при эксплуатации судов-газовозов в различных климатических условиях.
- Определение наилучшего соотношения между емкостью и производительностью установки повторного сжижения газа по экономическому критерию.
- Поддержка проектных решений в плане нахождения баланса между альтернативными средствами эффективного охлаждения СПГ (теплоизоляция танков или использование установок повторного сжижения)
- Моделирование процесса бункеровки судов, использующих СПГ в качестве топлива, с контуром обратной закачки и последующего сжижения сопутствующего выпара в емкости судна-бункеровщика.

Результаты верификации модели и примеры ее использования для решения вышеперечисленных практических задач однозначно свидетельствуют о том, что метод имитационного моделирования в данной предметной области имеет большие перспективы и может служить достойной альтернативой дорогостоящим натурным испытаниям и экспериментам.