

Евгений Сергеевич СОЛДАТОВ¹

УДК 519.63:621.642.8

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КРИОГЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ С ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ФАЗ

¹ инженер направления «Нефть и газ», АО «Линде Газ Рус» (г. Балашиха)
volshbnoekoltso@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены численные методы исследования процесса нестационарного теплообмена в резервуаре при длительном хранении криогенных жидкостей. В связи с отсутствием на сегодняшний день универсальной модели турбулентности отмечена перспективность использования метода осреднения по Рейнольдсу и применяемых для замыкания системы уравнений полуэмпирических моделей турбулентности благодаря приемлемым требованиям к вычислительным ресурсам. Представлена компьютерная модель для расчета теплофизических параметров криопродукта, учитывающая перемещение границы раздела фаз «жидкость — пар» внутри сосуда. Проведено сравнение двухпараметрических полуэмпирических моделей турбулентности применительно к решению поставленной задачи с точки зрения длительности расчета, требований к вычислительным ресурсам и точности полученных результатов. На основе экспериментальных данных о параметрах температурного поля в паровом пространстве резервуара со сжиженным природным газом проведена верификация разработанной компьютерной модели для каждой из проанализированных моделей турбулентности. На основании результатов моделирования сделан вывод о возможности и целесообразности проведения численного исследования (вместо дорогостоящего экспериментального) для расчета теплофизических параметров при длительном хранении, в том числе для расчета оценки величины перемещения границы раздела фаз.

Цитирование: Солдатов Е. С. Численное исследование нестационарного теплообмена в криогенном резервуаре длительного хранения с подвижной границей раздела фаз / Е. С. Солдатов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 148-159. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-148-159

Ключевые слова

Численное исследование, нестационарный теплообмен, модель турбулентности, метод конечных объемов, криогенный резервуар, долговременное хранение, сжиженный природный газ.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-148-159

Введение

За последние годы значительно увеличился интерес к использованию сжиженного природного газа (СПГ) в качестве экологически чистого и эффективного энергоносителя. Широкое распространение в России данного топлива, наряду с серьезным возрастанием его доли за рубежом, затруднено по ряду причин. В частности, сдерживающим фактором развития инфраструктуры СПГ являются проблемы с транспортировкой и хранением.

Развитие серийного производства систем долговременного хранения СПГ в Российской Федерации позволило бы осуществить прорыв в решении проблемы газификации отдаленных районов, куда экономически невыгодно прокладывать магистральные газопроводы. По оценкам экспертов, до 50% населенных пунктов, где на сегодняшний день отсутствует газификация, в перспективе целесообразно обеспечивать топливом именно с помощью СПГ [5].

Разработка современных высокоэффективных и безопасных систем долговременного хранения криогенных жидкостей ставит перед исследователями новые задачи по изучению гидродинамики и теплообмена в резервуарах с криопродуктами, в том числе и с СПГ.

До недавнего времени экспериментальный метод с использованием теории обобщенных переменных [4] считался наиболее целесообразным для исследования термодинамических процессов в резервуаре при длительном хранении низкотемпературных жидкостей. Это связано, как правило, со сложностью решения системы уравнений гидродинамики при турбулентном режиме течения, который в основном и реализуется на практике в промышленных криогенных емкостях [3].

В связи с вышесказанным актуальной является задача численного исследования уравнений, описывающих гидродинамику и нестационарный теплообмен в криогенном резервуаре долговременного хранения с использованием современных программных комплексов, использующих различные модели турбулентности, позволяющие адекватно описать термодинамические параметры для газовой и жидкостной фазы.

Обозначенная проблема осложнена тем, что в настоящее время не существует единой методики оценки величины пространственного перемещения границы раздела фаз «жидкость — пар» в криогенном резервуаре в процессе долговременного хранения. Из-за неизбежно возникающего температурного расслоения процесс изохорного нагрева системы «газ — жидкость» сильно отличается от теоре-

тического равновесного [4, с. 14]. В связи с чем крайне затруднительно спрогнозировать окончание времени хранения в криогенных емкостях.

Целью работы являлась разработка компьютерной модели, описывающей поведение криопродукта в резервуаре при условии подвижной границы раздела жидкой и паровой фазы, с использованием различных моделей турбулентности и ее верификация применительно к хранению сжиженного природного газа.

Численные методы исследования процессов теплообмена в криогенном резервуаре

При проведении исследования рассматривалась макроскопическая модель вещества, для которой действуют следующие фундаментальные допущения: жидкость и газ являются сплошными текучими средами с непрерывным распределением массы и других физических параметров [11]. Также будем рассматривать только ньютоновские жидкости, т. е. среды, в которых касательные напряжения прямо пропорциональны скорости угловых деформаций.

Для описания теплофизических и гидродинамических характеристик рассматриваемой сплошной среды в резервуаре записывают систему следующих фундаментальных уравнений:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}, \quad (1)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \lambda \Delta T, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (3)$$

где \vec{u} — вектор скорости; τ — время; T — температура; ρ — плотность; c_p — теплоемкость; p — давление; ν — кинематическая вязкость; \vec{f} — вектор поля массовых сил; λ — коэффициент теплопроводности.

Соотношение (1) является векторным уравнением движения Навье — Стокса, уравнение (2) — уравнением энергии, которое включается в математическую модель для описания переменного температурного поля, соотношение (3) — уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости.

Рассматриваемая нелинейная система уравнений в настоящее время решается преимущественно численными методами. Одним из наиболее точных методов ее решения является прямое численное моделирование (direct numerical simulation, DNS). Однако перспектива его использования в инженерных расчетах, ввиду колоссальных требований по вычислительным мощностям, неясна даже в ближайшем будущем [6]. По той же причине, а именно из-за высокой требовательности к вычислительным ресурсам, существенно ограничена возможность использования метода крупных вихрей (large eddy simulation, LES).

Весьма перспективным в настоящее время является использование метода осреднения уравнений Навье — Стокса по Рейнольдсу (Reynolds-averaged Navier — Stokes, RANS).

Система уравнений Рейнольдса получается по сути осреднением системы уравнений Навье — Стокса по времени. Интервал времени, по которому выполнено осреднение, намного больше характерного масштаба турбулентности, но меньше временного масштаба течения.

С учетом соотношений декомпозиции [7] уравнение Рейнольдса запишется следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho \bar{g}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j), \quad (4)$$

где \bar{u}_i, \bar{u}_j — усредненные скорости; \bar{u}'_i, \bar{u}'_j — отклонения от средних значений; $\bar{\sigma}_{ij}$ — напряжения в жидкости.

Для определения всех неизвестных параметров — скорости, давления и напряжений Рейнольдса — требуются дополнительные уравнения (проблема «замыкания турбулентности»), при этом необходимо использовать различные модели турбулентности.

Модели турбулентности для течений в замкнутом пространстве криогенного резервуара

В настоящее время существует множество разновидностей моделей турбулентности, и, к сожалению, пока не найдено универсальной модели для расчета любых турбулентных течений. На практике при расчете турбулентных течений для достаточно точного учета процессов сжимаемости газа и естественной конвекции наиболее часто пользуются моделями турбулентности семейства « k - ε ». Такие модели являются полуэмпирическими, показывают неплохие результаты для течений в замкнутых пространствах и, соответственно, могут быть использованы при рассмотрении гидродинамических процессов в криогенных резервуарах.

В стандартной модели турбулентности « k - ε » используется два транспортных дифференциальных уравнения для вычисления кинетической энергии k и турбулентной диссипации ε .

Турбулентная вязкость для моделей турбулентности типа « k - ε » описывается соотношением Колмогорова — Прандтля [14]:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Выражения для стандартной модели турбулентности « k - ε » записываются следующим образом [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (6) \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \end{aligned}$$

$$+ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}, \quad (7)$$

где G_k — турбулентная кинетическая энергия, образованная средними градиентами скорости; G_b — кинетическая энергия выталкивающей силы; Y_M — вклад переменного расширения в общую скорость диссипации (в нашем случае не учитывается, поскольку эффект проявляется только для больших чисел Маха).

Для модели турбулентности « k - ε » вводятся константы, которым на основе эмпирических данных присваиваются следующие значения:

$$C_{\mu} = 0,09; C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92; \sigma_k = 1,44; \sigma_{\varepsilon} = 1,3.$$

Другой моделью турбулентности, показывающей неплохие результаты при описании течений в замкнутых пространствах, является модель « RNG k - ε », полученная с помощью теории ренормализованных групп [13]. Уравнения для данной модели турбулентности записываются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_{\varepsilon} \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) +$$

$$+ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{\varepsilon} + S_{\varepsilon}, \quad (9)$$

где μ_{eff} — эффективная вязкость. Основное отличие рассматриваемой модели от стандартной в дополнительном коэффициенте:

$$R_{\varepsilon} = \frac{C_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2 \varepsilon^3}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad (10)$$

где $\eta = Sk/\varepsilon$; $\eta_0 = 4,38$; $\beta = 0,012$.

За счет наличия этого коэффициента улучшается точность вычислений для жидкостей с высокими деформационными скоростями. Также в модели учитывается влияние завихренности на турбулентность, т. е. увеличивается точность для высокозавихренных жидкостей. Рассмотренные преимущества во многих случаях делают модель « RNG k - ε », в сравнении со стандартной, более надежной и более точной, а также применимой для более широкого класса жидкостей.

Важной особенностью моделей « k - ε » является использование так называемой пристеночной функции, которая автоматически подключается при недостаточной плотности сетки. Поскольку по мере приближения к поверхности стенок в вязком подслое значительно увеличивается плотность сетки, резко возрастают затраты вычислительных ресурсов. При подключении рассматриваемой функции безразмерный критерий высоты первой пристеночной ячейки y^+ увеличивается до значений $30 < y^+ < 100$, и время выполнения расчета сокращается.

Описание компьютерной модели, принятые допущения

В программном комплексе ANSYS Fluent разработана компьютерная модель, описывающая нагрев в замкнутом объеме системы «газ — жидкость». Численное решение системы уравнений для законов сохранения массы, импульса и энергии реализовано с помощью метода конечных объемов, предполагающего разделение расчетной области на множество локальных ячеек. Эти уравнения, записанные в интегральной форме для каждого элемента, затем преобразуются в систему алгебраических уравнений относительно температуры и скорости в центрах расчетных ячеек.

Согласно имеющимся опытным данным [3, с. 80], в горизонтальных сечениях основной массы жидкости отсутствуют заметные градиенты температуры. В связи с этим было принято решение рассматривать двумерную модель. В итоге изучалось плоское двухфазное течение в поле силы тяжести с заданной начальными условиями границей раздела фаз.

В некоторых исследованиях [1; 12, с. 340; 14, с. 3138] предлагалось рассматривать отдельно паровое и жидкостное пространство резервуара, т. е. строить две независимые математические модели с последующим сопряжением полученных результатов на границе раздела. В данном случае граница раздела фаз является по сути стационарной. Преимуществом такого подхода является серьезная экономия вычислительных ресурсов. Однако на практике большинство процессов длительного промышленного хранения криогенной жидкости происходит с подвижной границей раздела фаз. При этом, как правило, принимается, что граница раздела перемещается вдоль вертикальной оси резервуара вверх или вниз в зависимости от режима хранения и начальной степени заполнения резервуара жидкостью.

Характерным отличием предложенной в настоящей работе математической модели является двухфазность, что позволяет производить нестационарный расчет с переменной границей раздела фаз «жидкость — пар». Для описания процессов взаимодействия между фазами в ANSYS Fluent применена встроенная модель кипения-конденсации (evaporation-condensation mechanism) [10].

Особенностью долговременного хранения некоторых криогенных жидкостей, широко используемых в промышленности, например сжиженного природного газа, является переменность газового состава жидкой и паровой фазы при хранении. В течение нескольких дней наблюдалось значительное обогащение нижних слоев жидкости тяжелыми примесями: этаном, пропаном и другими углеводородами. По результатам опытных данных [2], содержание метана в жидкой фазе после 30 суток хранения снизилось с 98 до 90%, содержание этана, напротив, повысилось до 4,3%, а пропана — до 1,5%. В паровом пространстве при этом существенно возрастала объемная доля азота, причем тем выше, чем больше исходная концентрация азота в природном газе. Вместе с этим при заправке новой порции СПГ компонентный состав смеси снова становился достаточно близким к исходному.

Изменение компонентного состава в процессе испарения части жидкости сказывается на изменении свойств газа, в частности теплоемкости и теплоты

парообразования. Следовательно, при моделировании процессов тепломассообмена желательно учитывать (во избежание погрешностей в вычислениях) переменность газового состава криогенного продукта. Тем не менее есть исследования [1, с. 972; 14, с. 3134; 15, с. 842], в которых одним из принятых допущений является то, что в куполе резервуара присутствуют пары жидкости и не содержатся посторонние газы. Учитывая, что рассмотрение многокомпонентной смеси сильно усложнит математическую модель, а также имея в виду тот факт, что использование в расчетах термодинамических свойств чистого метана дает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, принято допущение о том, что в газовом пространстве резервуара находятся только пары метана.

Результаты моделирования

На рис. 1 представлены результаты расчетов положения границы раздела фаз в резервуаре при различных начальных степенях заполнения. В качестве компонента рассматривался чистый метан, за ноль на оси ординат принято начальное положение границы раздела фаз «жидкость — пар» в начальный момент хранения.

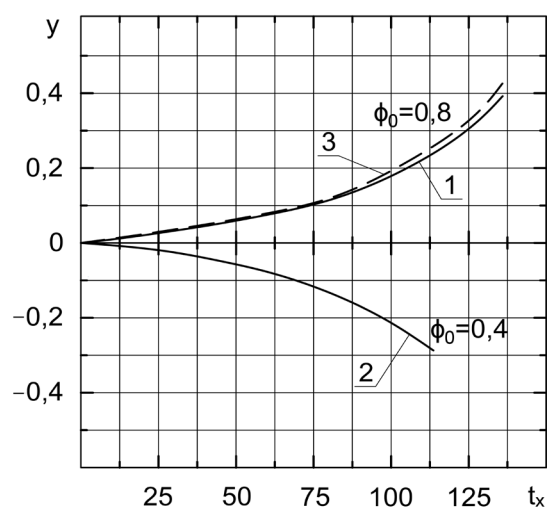


Рис. 1. Перемещение границы раздела фаз при длительном хранении

Примечания: 1 — расчет по модели «RNG $k-\varepsilon$ » для $\varphi_0 = 0,8$; 2 — расчет по модели «RNG $k-\varepsilon$ » для $\varphi_0 = 0,4$; 3 (пунктир) — расчет по стандартной « $k-\varepsilon$ » модели для $\varphi_0 = 0,8$; y — вертикальная координата, м; t_x — время хранения, ч; φ_0 — начальная степень заполнения резервуара.

Fig. 1. Moving the phase boundary during long-term storage

Notes: 1 — calculation according to the RNG $k-\varepsilon$ model for $\varphi_0 = 0.8$; 2 — calculation according to the RNG $k-\varepsilon$ model for $\varphi_0 = 0.4$; 3 (dotted line) — calculation according to the $k-\varepsilon$ model for $\varphi_0 = 0.8$; y — vertical axis, m; t_x — storage time, h; φ_0 — preliminary stage of filling the reservoir.

Полученные данные позволяют сделать вывод об универсальности предложенной модели, поскольку появляется возможность производить расчет теплофизических характеристик при любой начальной степени заполнения криогенного резервуара.

Было также проведено сравнение времени расчета одной итерации при использовании моделей стандартной «*k-ε*» и «*RNG k-ε*». В среднем время, затрачиваемое на расчет одной итерации для «*RNG k-ε*», оказалось на 11% больше, чем для стандартной модели.

Одним из ключевых теплофизических параметров при нестационарном нагреве криопродукта в резервуаре или цистерне является температура паровой фазы, т. к. наличие температурного расслоения ведет к быстрому росту давления и, соответственно, понижению времени хранения. Расчет температурного поля в паровом пространстве проводился по двум моделям: стандартной «*k-ε*» и «*RNG k-ε*». Распределение температуры газа по высоте резервуара при хранении, а также экспериментальные данные [12, с. 342] приведены в таблице 1 и свидетельствуют об удовлетворительном совпадении результатов.

Таблица 1

Результаты распределения температуры в паровом пространстве резервуара по высоте

Table 1

The results of the temperature distribution in the steam space by height of the tank

Вертикальная координата <i>y</i> , м	Температура паровой фазы <i>T</i> , К		
	Расчет по модели « <i>k-ε</i> »	Расчет по модели « <i>RNG k-ε</i> »	Эксперимент
0	111	111	111
0,125	116	115	115
0,250	119	118	118
0,375	123	121	120
0,500	140	137	131
0,625	162	159	144
0,750	179	174	162
0,875	227	218	206
1,000	264	256	243

Выводы

По результатам анализа основных методов решения уравнений гидродинамики и теплообмена в резервуаре долговременного хранения криогенной жидкости показано преимущество метода осреднения уравнений Навье — Стокса

по Рейнольдсу как наиболее приемлемого с точки зрения требуемых вычислительных ресурсов. Рассмотрены модели турбулентности с двумя дифференциальными уравнениями, с применением которых разработана компьютерная модель нестационарного нагрева системы «газ — жидкость» в программном комплексе ANSYS Fluent. Сравнение результатов расчетов температурного поля по двум моделям турбулентности с экспериментальными данными подтвердило адекватность предложенной математической модели. При использовании модели «RNG $k-\varepsilon$ » время вычисления в среднем увеличивалось на 11% по сравнению со стандартной моделью. При этом в точках максимальных расхождений с эмпирическими данными наблюдалось повышение точности расчета на 30-40%.

Продемонстрирована возможность замены дорогостоящих испытаний на натуральных образцах криогенных резервуаров численным экспериментом в системе компьютерного моделирования. Перспективной является задача дальнейшего совершенствования компьютерной модели с целью сокращения общего времени расчетов, а также учета изменения компонентного состава криогенного продукта разной чистоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амирханян Н. В. Теоретический анализ и методика расчета теплофизических процессов, протекающих в криогенной емкости в режиме бездренажного хранения / Н. В. Амирханян, С. Г. Черкасов // Теплофизика высоких температур. 2001. Том 39. № 6. С. 970-976. DOI: 10.1023/A:1013103425192
2. Бармин И. В. Сжиженный природный газ: вчера, сегодня, завтра / И. В. Бармин, И. Д. Кунис; под ред. А. М. Архарова. М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2009. 256 с.
3. Беляков В. П. Криогенная техника и технология / В. П. Беляков. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
4. Домашенко А. М. Тепломассообмен и гидродинамика в криогенных топливных системах на объектах наземного и морского базирования / А. М. Домашенко // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 3 (71). С. 12-60.
5. Енжаева Т. В. Снабжение потребителей газовым топливом в условиях ограничения поставок / Т. В. Енжаева // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2018. № 4 (30). С. 13-17.
6. Исаев А. И. Гидродинамическая верификация и валидация численных методов расчета течения в камере сгорания газотурбинного двигателя / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Труды МАИ. 2017. № 97. С. 7.
7. Коркодинов Я. А. Обзор семейства $k-\varepsilon$ моделей для моделирования турбулентности / Я. А. Коркодинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Том 15. № 2. С. 5-16.
8. Кузьминов А. В. Метод расчета турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной ($k-\varepsilon$)-модели / А. В. Кузьминов, В. Н. Лапин, С. Г. Черный // Вычислительные технологии. 2001. Том 6. № 5. С. 73-86.

9. Кукушкин Ю. А. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем / Ю. А. Кукушкин, А. В. Богомолов, И. Б. Ушаков // Информационные технологии. 2004. № 7. 32 с.
10. Федорова Н. Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
11. Харитонов В. П. Фундаментальные уравнения механики жидкости и газа / В. П. Харитонов. М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2012. 65 с.
12. Hariti R. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in a storage tank / R. Hariti, M. Fekih, M. Saighi // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM). 2013. Vol. 2. № 8. Pp. 340-343.
13. Orszag S. A. Renormalization group modeling and turbulence simulations / S. A. Orszag, V. Yakhot, W. S. Flannery, F. Boysan, D. Choudhury, J. Maruzewski, B. Patel // Near-Wall Turbulent Flows: proceedings of the International Conference on Near-Wall Turbulent Flows (15-17 March 1993, Tempe, Arizona). Amsterdam; New York: Elsevier, 1993. Pp. 1031-1046.
14. Roh S. Numerical study of natural convection in a liquefied natural gas tank / S. Roh, G. Son // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. Vol. 26. № 10. Pp. 3133-3140. DOI: 10.1007/s12206-012-0820-x
15. Zakaria M. S. Computational simulation of boil-off gas formation inside liquefied natural gas tank using evaporation model in ANSYS Fluent / M. S. Zakaria, K. Osman et al. // Applied Mechanics and Materials. 2013. № 393. Pp. 839-844. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.393.839

Evgeny S. SOLDATOV¹

UDC 519.63:621.642.8

**NUMERICAL STUDY OF NON-STATIONARY HEAT
AND MASS TRANSFER IN CRYOGENIC LONG-TERM
STORAGE TANK WITH MOVABLE PHASE BOUNDARY**

¹ Application Engineer, Linde Gas Rus (Balashikha)
volshebnoekoltso@mail.ru

Abstract

This article deals with numerical methods for studying the process of unsteady heat and mass transfer in a tank during long-term storage of cryogenic liquids. Along with the absence of a universal turbulence model to date, the author notes the prospects of using the Reynolds-averaged method RANS and the semi-empirical turbulence models used to close the system of equations, due to the acceptable requirements for computing resources. This paper presents the model for calculating thermophysical properties of cryogenic products, taking into account the movement of the phase boundary liquid-vapor inside the vessel. In addition, the author compared two-parameter semiempirical turbulence models applied to the solution of the problem in terms of a) the duration of the calculation, b) the requirements for computing resources, and c) the accuracy of the results. Based on experimental data on the parameters of the temperature field in the vapor space of the reservoir with liquefied natural gas, the author verified the proposed model for each of the analyzed turbulence models. Based on the simulation results, he concludes that it is possible and expedient to carry out a numerical study (instead of an expensive experimental one) for calculating the thermophysical parameters for long-term storage, including the assessment of the value of the movement of the phase boundary.

Keywords

Numerical study, unsteady heat and mass transfer, turbulence model, finite volume method, cryogenic tank, long-term storage, liquefied natural gas.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-148-159

Citation: Soldatov E. S. 2019. "Numerical study of non-stationary heat and mass transfer in cryogenic long-term storage tank with movable phase boundary". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 2, pp. 148-159.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-148-159

REFERENCES

1. Amirkhanyan N. V., Cherkasov S. G. 2001. "Theoretical Analysis and Procedure for the Calculation of Thermophysical Processes Occurring in a Cryogenic Vessel under Conditions of Nonvented Storage". *High temperature*, vol. 39, no 6, pp. 970-976. DOI: 10.1023/A:1013103425192
2. Barmin I. V., Kunis I. D. 2009. *Liquefied Natural Gas: Yesterday, Today and Tomorrow*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. [In Russian]
3. Belyakov V. P. 1982. *Cryogenic Engineering and Technology*. Moscow: Energoizdat. [In Russian]
4. Domashenko A. M. 2009. "Heat and mass transfer and hydrodynamics in cryogenic fuel systems at ground-based and sea-based objects". *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, no 3 (71), pp. 12-60. [In Russian]
5. Yenzhayeva T. V. 2018. "Gas supply to consumers for limited quantities". *Tekhnicheskoye regulirovaniye v transportnom stroitel'stve*, vol. 4 (30), pp. 13-17. [In Russian]
6. Isayev A. I., Skorobogatov S. V. 2017. "Hydrodynamic verification and validation of numerical methods of the flow calculation in combustion chamber of a gas turbine engine". *Trudy MAI*, no 97, p. 7. [In Russian]
7. Korkodinov Ya. A. 2013. "The review of set of k- ϵ models for modeling turbulence". *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, vol. 15, no 2, pp. 5-16. [In Russian]
8. Kuzminov A. V., Lapin V. N., Chernyy S. G. 2001. "Method for calculating turbulent incompressible fluid flows based on a two-layer (k- ϵ) model". *Computational Technologies*, vol. 6, no 5, pp. 73-86. [In Russian]
9. Kukushkin Yu. A., Bogomolov A. V., Ushakov I. B. 2004. "Mathematical software for assessing the state of material systems". *Information Technology*, no 7. [In Russian]
10. Fedorova N. N., Val'ger S. A., Danilov M. N., Zakharova Yu. V. 2017. *Working Basics in ANSYS 17*. Moscow: DMK Press. [In Russian]
11. Kharitonov V. P. 2012. *Fundamental Equations of Fluid and Gas Mechanics*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. [In Russian]
12. Hariti R., Fekih M., Saighi M. 2013. "Numerical simulation of heat transfer by natural convection in a storage tank". *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM)*, vol. 2, no 8, pp. 340-343.
13. Orszag S. A., Yakhot V., Flannery W.S., Boysan F., Choudhury D., Maruzewski J., Patel B. 1993. "Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations". In: *Near-Wall Turbulent Flows: proceedings of the International Conference on Near-Wall Turbulent Flows (15-17 March 1993, Tempe, Arizona)*, pp. 1031-1046. Amsterdam; New York: Elsevier.
14. Roh S., Son G. 2012. "Numerical study of natural convection in a liquefied natural gas tank". *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no 10, pp. 3133-3140. DOI: 10.1007/s12206-012-0820-x
15. Zakaria M. S., Osman K. et al. 2013. "Computational simulation of boil-off gas formation inside liquefied natural gas tank using evaporation model in ANSYS Fluent". *Applied Mechanics and Materials*, vol. 393, pp. 839-844. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.393.839