

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 621.59:621.642.8

DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-1-92-98

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КРИОГЕННОМ РЕЗЕРВУАРЕ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN THE CRYOGENIC RESERVOIR OF LONG-TERM STORAGE LIQUEFIED NATURAL GAS

Е.С. Солдатов
E.S. Soldatov

Акционерное общество «Линде Газ Рус»,
Россия, 143900, Московская обл., Балашиха, ул. Беякова, 1а

Joint-stock company «Linde Gas Rus»,
1a Belyakova St, Balashikha, Moscow Region, 143900, Russia

E-mail: volshebnoekoltso@mail.ru

Аннотация

Рассмотрена проблема температурной и компонентной стратификации в криогенном резервуаре длительного хранения сжиженного природного газа. Представлена формальная постановка задачи математического моделирования процессов теплообмена и последовательность расчета оценок параметров температурного поля в криогенном резервуаре в процессе длительного хранения с закрытым клапаном газосброса. Приведены результаты оценивания температурной стратификации, возникающей в процессе длительного хранения сжиженного природного газа, с использованием полуэмпирической модели турбулентности. Полученные данные применимы для уточненной оценки тепловой нагрузки на холодильную машину системы реконденсации паров природного газа.

Abstract

The problem of temperature and component stratification in a long-term storage cryogenic reservoir with liquefied natural gas is considered. A formal formulation of the problem of mathematical modeling of heat and mass transfer processes and the sequence of calculation of estimates of the temperature field parameters in a cryogenic tank during long-term storage with a closed gas discharge valve are presented. Modern numerical methods of solving the system of equations of heat and mass transfer and continuous medium hydrodynamics using the newest software systems, in particular with the use of energy equations and turbulence models, are described. The results of estimating the temperature stratification occurring during the process of long-term storage of liquefied natural gas using a semi-empirical turbulence model are presented. The data obtained are applicable for the specified assessment of the thermal working load of the refrigeration unit for the natural gas vapor recondensation system.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, теплообмен в криогенном резервуаре, длительное хранение сжиженного природного газа, моделирование процессов теплообмена в криогенном резервуаре, модель температурного поля в криогенном резервуаре.

Keywords: liquefied natural gas, heat transfer in a cryogenic tank, long-term storage of liquefied natural gas, modeling of heat and mass transfer processes in a cryogenic tank, model of a temperature field in a cryogenic tank.

Введение

В настоящее время перед исследователями и конструкторами стоит задача создания современных высокоэффективных и безопасных систем долговременного хранения сжиженного природного газа (СПГ), в конструкции которых были бы максимально учтены все нюансы тепломассообменных процессов внутри криогенного резервуара [Домашенко, 2009; Бармин, Кунис, 2009; Коробцов, 2011; Грандафилов, Хмельнюк, 2018].

Поскольку речь пойдет о системах долговременного хранения, когда крайне нежелательны потери продукта, будем рассматривать только системы с закрытым газосбросом. При таком способе хранения в неподвижной криогенной емкости происходит температурное расслоение (температурная стратификация) по высоте столба жидкости, связанное с процессом свободно-конвективного теплообмена, что приводит к снижению времени хранения СПГ по сравнению с равновесным процессом [Домашенко, 2005]. При этом пар в верхней части сосуда становится перегретым по отношению к жидкости, соответственно в неподвижном контейнере давление в газовой подушке растёт более интенсивно, чем в движущемся, вплоть до достижения давления срабатывания предохранительных клапанов [Беляков, 1982].

При долговременном хранении СПГ в резервуаре под действием теплопритоков из окружающей среды происходит испарение части жидкого продукта. В первую очередь, газовая фаза резервуара обогащается низкокипящими компонентами – азотом и метаном. В жидкости, в свою очередь, будет возрастать доля примесей тяжелых углеводородов.

Опытные данные показывают, что образующийся газ содержит 80% метана, 20% азота и следы этана [Беляков, 1982; Бармин, Кунис, 2009]. Изменение компонентного состава газа в процессе испарения части жидкости скажется на изменении свойств газа, в частности теплоемкости и теплоты парообразования. Также при хранении СПГ может произойти стратификация жидкости на слои разной плотности: иногда это приводит к внезапному испарению, например, нижнего слоя, который находится в состоянии перегрева по отношению к давлению в газовой подушке резервуара (явление носит название «ролловер») [Бармин, Кунис, 2009]. В результате в емкости резко возрастает давление и существует опасность разрушения сосуда.

С учетом вышеописанных явлений необходимо предпринимать меры, предотвращающие температурную и компонентную стратификацию в резервуаре. Также ведется поиск расчетных моделей и методик, позволяющих с приемлемой точностью оценить степень температурного расслоения как в жидкой, так и в паровой фазе криопродукта.

Постановка задачи расчета скоростей и температур жидкости и газа в системах долговременного хранения сжиженного природного газа

Расчет параметров СПГ при нагреве в замкнутом объеме связан с решением системы дифференциальных уравнений теплообмена и гидродинамики. В данном случае одним из ключевых процессов в криогенном резервуаре, подлежащих корректному описанию, является естественная конвекция.

Классический подход предполагает решение системы уравнений гидродинамики для жидкости, записываемых в векторном виде следующим образом [Беляков, 1982]:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial \tau} + (\vec{W} \cdot \nabla) \vec{W} = -\beta(T - T_0) \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \cdot \vec{W},$$

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

$$\nabla \cdot \vec{W} = 0,$$

где \vec{W} – вектор скорости, β – коэффициент объемного расширения, τ – время, T – температура, T_0 – начальная температура, \vec{g} – вектор ускорения свободного падения, ρ – плотность, p – давление, ν – кинематическая вязкость, λ – коэффициент теплопроводности.

Приведенная выше система уравнений нелинейна и сильно зависит от начальных и граничных условий, поэтому найти аналитическое решение в общем виде пока не представляется возможным. Решение системы численными методами до недавнего времени было возможно только для ламинарного режима течения. Современные математические модели, созданные в новейших программных комплексах (зарубежных пакетах ANSYS, COMSOL, а также отечественных – ПК «ЛОГОС»), позволяют получить полезные с практической точки зрения результаты, в том числе и при турбулентном режиме течения.

Уравнения нестационарного поля температур с безразмерными линейными размерами наиболее часто записывают в виде [Трандафилов, Хмельнюк, 2018; Аверкова и др., 2010; Аверкова и др., 2011; Кукушкин и др., 2004]:

$$\bar{x} = x/h_f, \quad \bar{\delta}_s = \delta/h_f,$$

где x – координата, δ – толщина пограничного слоя, h_f – высота столба жидкости; безразмерными скоростями

$$\bar{U} = Uh_f/v_f, \quad \bar{w} = wh_f/v_f,$$

и безразмерными температурами

$$\bar{\theta} = (T - T_0)\lambda_f/(q_{wl}h_f), \quad \bar{\theta}_w = (T_w - T)\lambda_f/(q_{wl}h_f),$$

где T – температура, θ – безразмерный параметр температуры, λ – коэффициент теплопроводности, v_f/h_f и $q_{wl}h_f/\lambda_f$ – параметры, соответственно, скорости и температуры.

Дифференциальное уравнение переноса теплоты в поверхностном слое и ядре записывается в виде

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial Fo} - \bar{U} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + f_q,$$

где f_q – функция теплового источника.

При значениях степени заполнения сосуда жидкостью $h_f/h_w = 0,7...0,9$ справедливы следующие начальные и граничные условия:

$$\bar{\theta}(\bar{x}, 0) = 0, \quad \frac{\partial \bar{\theta}(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \bar{\theta}(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}(0, Fo)}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \bar{\theta}(1, Fo)}{\partial \bar{x}} = 0, \quad \bar{U} = 0,585 \text{Pr} K_4 \bar{w} \bar{\delta}_s, \text{ для } \bar{x} < 1 - \bar{\delta}_s,$$

и

$$\bar{U} = \text{Pr} \bar{U}_s \left(\frac{1 - \bar{x}}{\bar{\delta}_s} \right)^n, \quad f_q = 0,146 \text{Pr} K_4 \bar{w} \theta_{ws}, \text{ для } 1 - \bar{\delta}_s \leq \bar{x} \leq 1,$$

где $\bar{\theta} = (T - T_0)\lambda_f/(q_{wl}h_f)$ – избыточная температура по оси сосуда; $Fo = a_f \tau / h_f^2$ – число Фурье; \bar{U} – скорость конвективного переноса тепла в поверхностном слое и ядре по оси; $\bar{w} = wh_f/v_f$ – скорость жидкости в пограничном слое; \bar{U}_s – скорость опускания жидкости на оси при $\bar{x} \leq 1 - \bar{\delta}_s$; θ_{ws} – избыточная температура стенки на поверхности раздела фаз; $\bar{\delta}_s = \delta/h_f$ – безразмерная толщина поверхностного слоя; $\bar{x} = x/h_f$ – текущая координата; $K_4 = h_f/D$ – характеризующая перенос тепла через пограничный слой в поверхностный

слой; n – показатель степени при аппроксимации распределения в прогретом слое с помощью параболического закона, Pr – число Прандтля.

Пограничный слой при условии неизотермичности среды:

$$\frac{d\bar{\delta}}{dx} = -2,39Gr \frac{\bar{\delta}\bar{\theta}_w}{w} + (0,436 + 1,244 Pr^{-2/3})(\bar{\delta}w)^{-1/4} - \left(2 \frac{d\bar{\theta}_w}{dx} + 8,16 \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial x} \right) \frac{\bar{\delta}}{\bar{\theta}_w},$$

$$\frac{d\bar{w}}{dx} = -2,39Gr \frac{\bar{\theta}_w}{w} - (0,436 + 1,244 Pr^{-2/3})\bar{\delta}^{-5/4} w_1^{-3/4} + \left(\frac{d\bar{\theta}_w}{dx} + 4,08 \frac{\partial\bar{\theta}}{\partial x} \right) \frac{\bar{w}_1}{\bar{\theta}_w},$$

где $Gr = g\beta qwh_f^4 / (\lambda_f v_f^2)$ – модифицированный критерий Грасгофа, $\bar{\theta}_w$ – избыточная температура стенки.

Перенос тепла вдоль тонкой стенки записывается в виде

$$\frac{d^2\bar{\theta}_w}{dx^2} - 0,0228 Pr^{1/3} \frac{K_3}{K_1 K_2} \bar{\delta}^{-1/4} \bar{W}^{3/4} \bar{\theta}_w = - \left(\frac{K_3}{K_1 K_2} + \frac{\partial^2\bar{\theta}}{\partial x^2} \right)$$

при граничных условиях

$$\frac{d\bar{\theta}_w}{dx} = \frac{d\bar{\theta}_w(0)}{dx}; \quad \frac{d\bar{\theta}_w(1)}{dx} = \frac{K_3}{K_1 K_2} - \frac{d\bar{\theta}(1)}{dx},$$

где $K_1 = \delta_w / h_w$ – характеристика геометрии стенки; $K_2 = \lambda_w / \lambda_f$, $K_3 = h_w / h_f$ – степень заполнения сосуда жидкостью.

Температурное поле в итоге будет являться функцией следующих независимых переменных:

$$\bar{\theta} = f(x, Fo, Pr, Gr, K_1, K_2, K_3, K_4).$$

Расчет параметров хранения СПГ в криогенном резервуаре долговременного хранения

В программном моделирующем комплексе ANSYS Fluent реализован метод конечных объемов, предполагающий разбиение области на множество локальных расчетных ячеек. Для каждого локального элемента записываются в интегральной форме законы сохранения массы, импульса и энергии [Hariti et al., 2013; Shukri et al., 2013]. Данные уравнения затем преобразуются в систему алгебраических уравнений относительно скорости и температуры в центрах расчетных ячеек.

Рассмотрим процесс нагрева сжиженного природного газа в ISO-контейнере. Имеющиеся экспериментальные данные [Беляков, 1982; Бармин, Кунис, 2009] указывают на отсутствие градиентов температуры в горизонтальных сечениях основной массы жидкости. Исходя из этого, при формировании геометрии модели целесообразно выбирать двумерную модель, рассматривая поперечное сечение горизонтального резервуара. Переход от трехмерной к двумерной модели позволяет существенно уменьшить затраты вычислительных ресурсов в процессе моделирования.

Термодинамические свойства сжиженного природного газа были рассчитаны с помощью программного комплекса Aspen HYSYS v.10. При расчете параметров реального газа использовался пакет свойств Пенга – Робинсона, после чего полученные данные были перенесены во Fluent. При расчете использовалась полуэмпирическая модель турбулентности *RNG k-ε*: такая модель позволяет учесть эффекты сжимаемости газа и естественной конвекции [Коркодинов, 2013; Adom et al., 2010; Chen et al., 2004; Roh, Son, 2012; Kandojiya, Mehta, 2017; Харитонов, 2012; Жихарев и др., 2016]. Расчетные значения температуры газа по высоте резервуара при хранении жидкого азота и СПГ без наддува, с предварительным наддувом и экспериментальные данные [Домашенко, 2009] приведены в таблице.

Сопоставление результатов расчетов температур при хранении продукта без предварительного наддува и с предварительным наддувом для жидкого азота (таблица) свидетельствуют об удовлетворительном совпадении экспериментальных и расчетных данных и позволяют сделать вывод об адекватности расчетов температуры для СПГ.

Полученные результаты использованы при проектных и конструкторских расчетах вновь разрабатываемых сосудов для хранения и транспортировки СПГ. В частности, рассчитанные значения температур использованы для получения уточненной оценки тепловой нагрузки на холодильную машину системы реконденсации паров [Chang, 2012; Lisowski, Czyzyski, 2011], применение которой является перспективным способом борьбы с температурным расслоением в интересах увеличения времени хранения криопродукта в резервуаре.

Таблица
Table

Расчетные значения температур в паровом пространстве криогенного резервуара по высоте
Calculated temperature values in the vapor space of the cryogenic tank in height

Высота парового пространства резервуара над зеркалом жидкости, м	Температура при хранении продукта, К					
	Без предварительного наддува			С предварительным наддувом		
	Жидкий азот		СПГ (расчет)	Жидкий азот		СПГ (расчет)
	Расчет	Эксперимент		Расчет	Эксперимент	
0	85	84	118	89	88	122
0,05	93	92	128	101	99	136
0,10	101	102	140	111	110	149
0,15	107	109	148	121	122	162
0,20	119	121	161	132	134	179

* * *

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет рассчитать температурное поле в резервуаре хранилища СПГ, причем переход при расчете от трехмерной к двумерной модели позволяет существенно уменьшить объем вычислений. Результаты математического моделирования показывают, что за счет температурной стратификации разность температур в паровой фазе жидкого продукта может достигать значений 30...40 К, что согласуется с экспериментальными данными. Учитывая склонность СПГ к температурному и компонентному расслоению целесообразно организовывать периодическое перемешивание жидкости в резервуаре с помощью циркуляционных насосов и реконденсацию паров в емкости хранения СПГ.

Список литературы References

1. Аверкова О.А., Зоря В.Ю., Логачев К.И. 2010. Компьютерное моделирование вихревых течений в аспирационном укрытии с щелевыми неплотностями. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 1(72): 93–100.

Averkova O.A., Zorya V.Yu., Logachev K.I. 2010. Komp'yuternoye modelirovaniye vikhrevykh techeniy v aspiratsionnom ukrytii s shchelevymi neplootnostyami. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 1(72): 93–100 (in Russian).

2. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. 2011. Разработка метода математического моделирования отрывных течений на основе дискретных стационарных вихрей. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 1(96): 130–136.

Averkova O.A., Logachev I.N., Logachev K.I. 2011. Razrabotka matematicheskogo modelirovaniya otrivnykh techeniy na osnove diskretnykh statsionarnykh vikhrey. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 1(96): 130–136 (in Russian).

3. Бармин И.В., Кунис И.Д. 2009. Сжиженный природный газ: вчера, сегодня, завтра. Под ред. А.М. Архарова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 256.

Barmin I.V., Kunis I.D. 2009. Szhizhennyu prirodnyu gaz: vchera, segodnya, zavtra. Pod red. A.M. Arkharova. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 256. (in Russian).

4. Беляков В.П. 1982. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 272.

Belyakov V.P. 1982. Kriogennaya tekhnika i tekhnologiya. Moscow: Energoizdat, 272 (in Russian).

5. Коробцов Е.В. 2011. Особенности формирования и развития рынка газа в современной России. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 19(114): 14–21.

Korobtsov Ye.V. 2011. Osobennosti formirovaniya i razvitiya rynka gaza v sovremennoy Rossii. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 19(114): 14–21.

6. Домашенко А.М. 2005. Тепломассообмен в стационарных и транспортных криогенных резервуарах, его влияние на эксплуатационные характеристики. Альтернативная энергетика и экология. 3: 32–38.

Domashenko A.M. 2005. Teplomassoobmen v stacionarnykh i transportnykh kriogennykh rezervuarakh, yego vliyaniye na ekspluatatsionnyye kharakteristiki. Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 3: 32–38 (in Russian).

7. Домашенко А.М. 2009. Тепломассообмен и гидродинамика в криогенных топливных системах на объектах наземного и морского базирования. Альтернативная энергетика и экология. 3: 12–60.

Domashenko A.M. 2009. Teplomassoobmen i gidrodinamika v kriogennykh toplivnykh sistemakh na ob'yektakh nazemnogo i morskogo bazirovaniya. Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 3: 12–60 (in Russian).

8. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Рябцева Я.Н., Махота А.С., Капустин А.В. 2016. Об имитационном моделировании функционирующих систем. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 9(230): 139–145.

Zhikharev A.G., Matorin S.I., Ryabtseva Ya.N., Makhota A.S., Kapustin A.V. 2016. Ob imitatsionnom modelirovanii funktsioniruyushchikh sistem. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. 9(230): 139–145 (in Russian).

9. Коркодинов Я.А. 2013. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 15(2): 5–16.

Korkodinov Ya.A. 2013. Obzor semeystva modeley dlya modelirovaniya turbulentsnosti. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye. 15(2): 5–16.

10. Кукушкин Ю.А., Богомолов А.В., Ушаков И.Б. 2004. Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем. Информационные технологии. 7 (приложение): 32.

Kukushkin Yu.A., Bogomolov A.V., Ushakov I.B. 2004. Matematicheskoye obespecheniye otsenivaniya sostoyaniya material'nykh sistem. Informatsionnyye tekhnologii. 7 (prilozheniye): 32. (in Russian).

11. Трандафилов В.В., Хмельнюк М.Г., 2018. Энергетические характеристики роторно-лопастной газовой холодильной машины для производства умеренного холода. Технические газы. 18(1): 10–19.

Trandafilov V.V., Khmel'nyuk M.G., 2018. Energeticheskiye kharakteristiki rotorno-lopastnoy gazovoy kholodil'noy mashiny dlya proizvodstva umerennogo kholoda. Tekhnicheskiye gazy. 18(1): 10–19 (in Russian).

12. Харитонов В.П. 2012. Фундаментальные уравнения механики жидкости и газа. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 65.

Kharitonov V.P. 2012. Fundamental'nyye uravneniya mekhaniki zhidkosti i gaza. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 65 (in Russian).

13. Adom E., Islam Z., Xianda J. 2010. Modeling of boil-off gas in LNG tanks: a case study. International Journal of Engineering and Technology. 2(4): 292–296.

14. Chang, H.M. 2012. Effect of multi-stream heat exchanger on performance of natural gas liquefaction with mixed refrigerant. Cryogenics, 52: 642–647.



15. Chen Q.-S., Wegrzyn J., Prasad V. 2004. Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas (LNG) cryogenic tanks. *Cryogenics*, 44: 701–709.
16. 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 (IIAIEM)* 2(8): 340–343.
17. Kandoliya P.D., Mehta N.C. 2017. Recent research on cryogenic storage tank: a review. *International journal for research in applied science & engineering technology (IJRASET)* 4(5): 1681–1686.
18. Lisowski E., Czyzycki W. 2011. Transport and storage of LNG in container tanks *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 18(3): 193–201.
19. Roh S., Son G. 2012. Numerical study of natural convection in liquefied natural gas tank. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 26(10): 3133–3140.
20. Shukri M. Osman K. 2013. Computational simulation of boil-off gas formation inside liquefied natural gas tank using evaporation model in ANSYS Fluent. *Applied Mechanics and Materials*, 393: 839–844.