

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОБМЕНА С ПОДВИЖНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ФАЗ ПРИ ХРАНЕНИИ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ КРИОТОПЛИВА В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

*Солдатов Е.С.*

*АО «Линде Газ Рус», г. Балашиха*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, нестационарный тепломассообмен, модель турбулентности, криогенный резервуар, криотопливо, долговременное хранение, сжиженный природный газ.

**Аннотация.** В статье представлены результаты компьютерного моделирования процесса нестационарного тепломассообмена при длительном хранении криотоплива в сосуде. На основе экспериментальных данных о параметрах температурного поля в паровом пространстве резервуара со сжиженным природным газом, проведена верификация предложенной модели. Сделан вывод о возможности и целесообразности проведения численного исследования, вместо дорогостоящего экспериментального, для расчета теплофизических параметров при долговременном хранении, в том числе, оценки величины перемещения границы раздела фаз.

## MODELING OF NON-STATIONARY HEAT AND MASS TRANSFER WITH A MOVING PHASE BOUNDARY DURING STORAGE AND TRANSPORTATION OF CRYOFUEL IN A CLOSED VESSEL

*Soldatov E.S.*

*Linde Gaz Rus, Balashiha*

**Keywords:** computer simulation, non-stationary heat and mass transfer, turbulence model, cryogenic reservoir, cryofuel, long-term storage, liquefied natural gas.

**Abstract.** The article presents the results of computer modeling of the process of non-stationary heat and mass transfer during a long-term storage of cryofuel in a vessel. Based on experimental data on the temperature field parameters in the vapor space of a reservoir with liquefied natural gas, the proposed model was verified. It is concluded that it is possible and expedient to perform a numerical study, instead of an expensive experimental one, for calculating thermophysical parameters during a long-term storage, including the assessment of the value of movement of the phase boundary.

Необходимость в разработке современных эффективных и безопасных жидкостных криогенных систем ставит перед исследователями новые задачи по изучению гидродинамики и тепломассообмена в резервуарах с криопродуктами, в том числе и со сжиженным природным газом (СПГ).

До недавнего времени экспериментальные исследования считались наиболее целесообразными для исследования термодинамических процессов в резервуаре при длительном хранении низкотемпературных жидкостей. Это связано, в основном, со сложностью решения системы уравнений гидродинамики при турбулентном режиме течения, который в основном и реализуется на практике в промышленных криогенных емкостях.

В связи с вышесказанным актуальной является задача численного исследования уравнений, описывающих гидродинамику и нестационарный тепломассообмен в криогенном резервуаре долговременного хранения с

использованием современных программных комплексов, использующих различные модели тепломассообмена, включая модели турбулентности, позволяющие адекватно описать термодинамические параметры для газовой и жидкостной фазы.

В программном комплексе ANSYS Fluent была разработана компьютерная модель, описывающая нагрев в замкнутом объеме системы газ-жидкость. На практике при расчете турбулентных течений для достаточно точного учета процессов сжимаемости газа и естественной конвекции наиболее часто пользуются моделями турбулентности семейства «k-ε». Данные модели являются полуэмпирическими, показывают неплохие результаты для течений в замкнутых пространствах и, соответственно, могут быть использованы при рассмотрении гидродинамических процессов в криогенных резервуарах.

В большинстве случаев [3, 4] исследователями рассматривается отдельно паровое и жидкостное пространства резервуара, т.е. создаются 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.

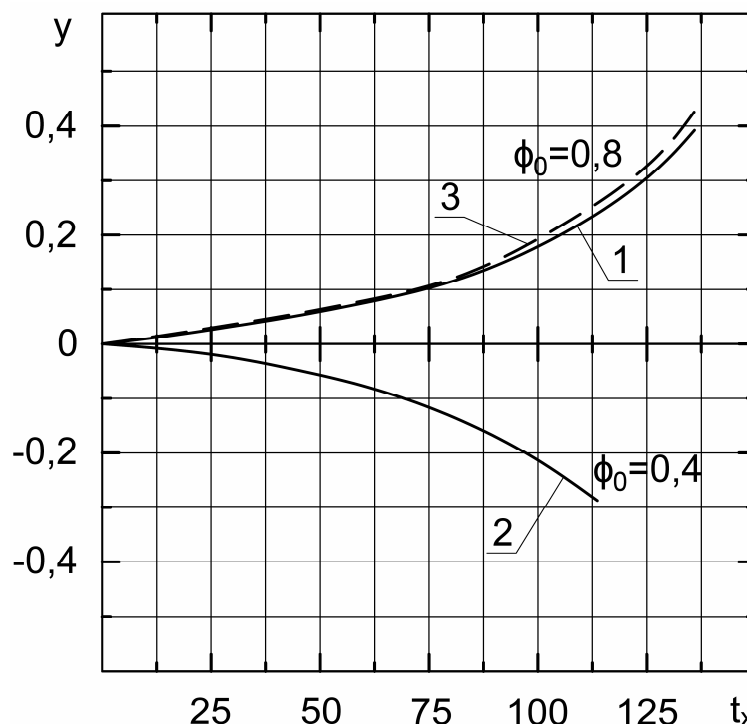
Характерным отличием предложенной в настоящей работе математической модели является двухфазность, что позволяет производить нестационарный расчет с переменной границей раздела фаз пар-жидкость. Для описания процессов взаимодействия между фазами в ANSYS Fluent применена встроенная модель кипения-конденсации (Evaporation-condensation mechanism) [2].

На рисунке 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 принята начальное положение границы раздела фаз жидкость-пар в начальный момент хранения.

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% выше, 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 [1], а также экспериментальные данные приведены в таблице 1.



1 – расчет по модели «RNG k-ε» для  $\phi_0=0,8$ ; 2 – расчет по модели «RNG k-ε» для  $\phi_0=0,4$ ; 3 (пунктир) – расчет по стандартной «k-ε» модели для  $\phi_0=0,8$ ; y – координата, м;  $t_x$  – время хранения, ч;  $\phi_0$  – начальная степень заполнения резервуара

Рис. 1. Перемещение границы раздела фаз при длительном хранении

Табл. 1. Результаты распределения температуры в паровом пространстве резервуара по высоте

y, м	T <sub>s</sub> , К		
	Расчет по модели «k-ε»	Расчет по модели «RNG k-ε»	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

Примечание: y – вертикальная координата; T<sub>s</sub> – температура паровой фазы.

Сравнение результатов расчетов температурного поля по двум моделям турбулентности с экспериментальными данными указывает на адекватность предложенной математической модели. При использовании модели «RNG k-ε» в точках максимальных расхождений с эмпирическими данными наблюдалось повышение точности вычислений на 30...40%, за счет незначительного увеличения времени сходимости расчета.

Продемонстрирована возможность замены дорогостоящих испытаний на натуральных образцах криогенных резервуаров численным экспериментом в системе компьютерного моделирования. Перспективной является задача дальнейшего

усовершенствования компьютерной модели с целью уменьшения общего времени расчета, а также учета изменения компонентного состава криогенного продукта разной чистоты.

#### **Список литературы**

1. Солдатов Е.С. Численное исследование нестационарного теплообмена в криогенном резервуаре долговременного хранения с подвижной границей раздела фаз // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. №2. С. 148-159. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-148-159.
2. 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.
3. 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 (IAIEM) No 2(8). 2013. P. 340-343.
4. Roh S. Numerical study of natural convection in liquefied natural gas tank / S. Roh, G. Son // Journal of Mechanical Science and Technology. No 26(10). 2012. P. 3133-3140.

#### Сведения об авторе:

*Солдатов Евгений Сергеевич* – инженер направления, АО «Линде Газ Рус», г.Балашиха.