

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева Н.В., Чернецкий М.Ю., Хрусталева Г.Н. Сравнительный анализ по математической модели аэродинамики, теплообмена и температурных полей двухвихревой топки с наличием и без заднего холостого дутья // Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, удаление и использование золы: Сборник докладов V научно-практ. конф. – Челябинск, 7–9 июня 2011. – Челябинск: ОАО «ИЦЭУ», 2011. – Т. 3. – С. 157–166.
2. Майданик М.Н., Вербовецкий Э.Х., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Гаврилов А.А., Бойков Д.В., Бердин С.В. Математическое моделирование топки и поворотного газохода котла П-50Р при совместном сжигании твердого и газообразного топлива // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 37–42.
3. Siegel R., Howell J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. – Washington D.C.: Hemisphere Publishing Corp., 1992. – 1072 p.
4. Magnussen B.F., Hjertager B.W. On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow // XIX<sup>th</sup> AIAA Aerospace Meeting. – St. Louis, USA, 1981. – P. 544–552.
5. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 3. – С. 37–46.
6. Crow C.T., Sharma M.P., Stock D.E. The particle source in cell (PSI-CELL) model for gas-droplet flows // Journal of Fluids Engineering. – 1977. – V. 99. – P. 325–332.
7. De Soete G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen // Proc. XV<sup>th</sup> Int. Symposium on Combust. – Pittsburgh: The Combustion Institute, 1975. – P. 1093–1102.

Поступила 26.12.2012 г.

УДК 536.2:51-74

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВО ВЛАГОУСТОЙЧИВОЙ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ КРИОЖИДКОСТЕЙ

В.Ю. Половников, А.М. Хабибулин

Томский политехнический университет  
E-mail: polov@tpu.ru

Приведены результаты математического моделирования теплообмена в ограждающих конструкциях резервуара для хранения криожидкостей и численный анализ потерь холода рассматриваемого объекта с учетом промерзания изоляции, наличия миграции влаги к фронту фазового перехода и конденсации влаги на внешнем контуре взаимодействия. Установлены масштабы увеличения теплопритоков в рассматриваемой системе вследствие увлажнения, промерзания и наличия фазовых переходов в структуре и на поверхности слоя изоляции.

### Ключевые слова:

Потери холода, математическое моделирование, тепловая изоляция, фазовые переходы, криожидкость.

### Key words:

Loss of cold, mathematical modeling, thermal insulation, phase transitions, cryogenic liquid.

### Введение

Целью энергетической политики России [1] является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций. Предполагается, что в результате реализации мероприятий, предусмотренных Стратегией [1], российский энергетический сектор внесет важнейший вклад в переход к устойчивому инновационному развитию российской экономики и обеспечит снижение удельной энергоемкости валового внутреннего продукта не менее чем в 2,3 раза к 2030 г.

Одним из направлений реализации Стратегии [1] в сфере энергоснабжения наряду с тотальной реконструкцией и применением автоматизированных узлов и систем управления является организация оптимальных режимов функционирования систем транспорта и хранения тепловой энергии. Су-

ществленную роль в выполнении Стратегии [1] призвана сыграть высокоэффективная тепловая изоляция, применяемая во всех областях промышленного производства и строительства.

Тепловая изоляция ограждений холодильных сооружений эксплуатируется в тяжелых условиях [2], прежде всего из-за непрерывных изменений температуры и влажности наружного воздуха, переменного воздействия солнечной радиации и ветра. Одной из особенностей работы изоляции холодильной техники является достаточно высокая вероятность конденсации водяного пара на поверхностях ограждения или внутри изоляции, а в некоторых случаях и замерзания выпавшей влаги [3]. Накопление влаги в теплоизоляционных конструкциях низкотемпературного оборудования может привести к столь значительному увеличению потерь холода, что необходима будет их полная замена [4].

Следует отметить, что используемые в настоящее время подходы к расчету тепловой изоляции

холодильной техники [4, 5] не учитывают многих особенностей теплообмена, реализующихся в рассматриваемых системах. К этим особенностям относятся нестационарность процессов теплопереноса, наличие влагообмена с окружающей средой, изменение теплофизических свойств изоляции в процессе эксплуатации, возможное промерзание слоя изоляции и др.

Имеющиеся публикации по процессам теплопереноса в низкотемпературной изоляции, например [4], базируются на упрощенном аналитическом описании процессов переноса, а предлагаемые в [4] математические модели в определенной мере далеки от реальных процессов теплопереноса, реализующихся в холодильной изоляции. Снижение теплозащитных характеристик низкотемпературной изоляции при наличии увлажнения в процессе эксплуатации в [4] учитывается введением поправочного коэффициента, а возможное промерзание тепловой защиты криообъектов не учитывается вовсе.

В связи с вышесказанным разработка новых подходов к анализу тепловых режимов и оценке теплопритоков к холодильным сооружениям различного назначения приобретает особую актуальность. Создание математических моделей, учитывающих комплекс физических процессов, реализующихся в теплозащитных конструкциях холодильной техники, позволит разработать прогностические модели оптимальных режимов функционирования рассматриваемых систем, характеризующиеся минимальными потерями холода и затратами на эксплуатацию, а также отвечающие принципам санитарно-гигиенической пригодности.

Целью данной работы является математическое моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей и численный анализ потерь холода рассматриваемых объектов с учетом конденсации влаги на внешнем контуре взаимодействия, промерзания слоя тепловой изоляции и наличия миграции влаги к фронту фазового перехода.

#### Постановка задачи

Рассматривается типичный резервуар для хранения криожидкостей [6]. Для тепловой изоляции резервуара совместно решаются одномерные нестационарные задачи теплопроводности и диффузии с учетом фазовых переходов и зависимости свойств изоляции от объемных долей влаги и льда. Схема области решения представлена на рис. 1.

Внешний контур изоляции резервуара контактирует с влажным воздухом (рис. 1), а влага, содержащаяся в нем, конденсируется на поверхности рассматриваемого объекта. Влагоперенос происходит только в талой (увлажненной) зоне путем миграции влаги к фронту промерзания за счет пленочно-диффузионного механизма [4]. Для задачи теплопроводности на внутренней  $R_1$  и внешней  $R_2$  границах слоя тепловой изоляции вводятся граничные условия первого и третьего рода соответственно. Для задачи переноса влаги на границе фазового перехода  $\xi$  выставляется условие идеальной гидроизоляции, а на внешнем контуре взаимодействия  $R_2$  — условие массообмена поверхности с окружающей средой (влажный воздух). В начальный момент времени температура  $T_0$  и относительное влагосодержание изоляции по объёму  $W_0$  равны постоянным величинам. Предполагается, что температура  $T_0$  равна температуре окружающей среды  $T_{oc}$ , а температура внутренней поверхности изоляции равна температуре холодной жидкости  $T_{ж}$ , которая ниже температуры замерзания  $T_{пл}$ . В результате охлаждения изоляции образуется промерзший слой (рис. 1) переменной толщины, причем подвижная граница фазового перехода всегда имеет постоянную температуру замерзания  $T_{пл}$ . Предполагается, что перенос тепла в изоляции происходит только вследствие теплопроводности.

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы резервуаров для хранения криожидкостей.

#### Математическая модель

Математическая постановка задачи базируется на апробированных подходах к моделированию физических процессов [2, 7, 8], и в предлагаемой постановке процессы переноса тепла и массы в рассматриваемой области решения (рис. 1) будут описываться следующими уравнениями:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_{\text{ф1}} \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad R_1 < r < \xi(t), \quad t > 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{\text{ф2}} \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad \xi(t) < r < R_2, \quad t > 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = D_2 \left( \frac{\partial^2 W_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_2}{\partial r} \right), \quad \xi(t) < r < R_2, \quad t > 0. \quad (3)$$



Рис. 1. Схематическое изображение области решения: 1 – зона промерзшей изоляции; 2 – зона увлажненной изоляции

Начальные условия:

$$T = T_0, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad t = 0; \quad (4)$$

$$W = W_0, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad t = 0. \quad (5)$$

Граничные условия:

$$T_1 = T_{\text{ж}}, \quad r = R_1, \quad t > 0; \quad (6)$$

$$-\lambda_{\text{эф}2} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha(T_2 - T_{\text{ос}}) - jQ_{\text{пар}}, \quad r = R_2, \quad t > 0; \quad (7)$$

$$-D_2 \frac{\partial W_2}{\partial r} = \beta(W_2 - W_{\text{ос}}), \quad r = R_2, \quad t > 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial r} = 0, \quad r = \xi(t), \quad t > 0; \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{эф}1} \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_{\text{эф}2} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \overline{W}Q_{\text{пл}} \bar{\rho} \frac{d\xi}{dt},$$

$$T_1 = T_2 = T_{\text{пл}}, \quad r = \xi(t), \quad t > 0. \quad (10)$$

Объемная доля льда в изоляции, вследствие расширения воды при замерзании, увеличивалась на 9 % [9]:

$$W_{\text{л}} = 1,09W_{\text{в}}.$$

Значения теплофизических свойств тепловой изоляции рассчитывались как эффективные с учетом объемных долей каждой компоненты. Например, эффективные коэффициенты теплопроводности находились из соотношений [2]:

$$\lambda_{\text{эф}1} = W_{\text{л}}\lambda_{\text{л}} + (1 - W_{\text{л}})\lambda_{\text{н}}, \quad \lambda_{\text{эф}2} = W_{\text{в}}\lambda_{\text{в}} + (1 - W_{\text{в}})\lambda_{\text{н}}.$$

Температура замерзания воды вычислялась по формуле [10]:

$$T_{\text{пл}} = (0,075 + 1,382 \cdot 10^{-8} \cdot p_{\text{атм}})(1 - 0,0009869 \cdot p_{\text{атм}}).$$

Удельная теплота плавления (кристаллизации) [10]:

$$Q_{\text{пл}} = 334,11 + 2,261 \cdot T_{\text{пл}}.$$

Удельная теплота парообразования (конденсации) [10]:

$$Q_{\text{пар}} = 2500,64 - 2,369 \cdot T_{\text{пар}},$$

Температура парообразования (конденсации) водяного пара [10]:

$$T_{\text{пар}} = \frac{241,2 \cdot \ln \frac{p_{\text{вп.парц}}}{0,6112}}{17,504 - \ln \frac{p_{\text{вп.парц}}}{0,6112}}.$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе [10]:

$$p_{\text{вп.парц}} = \frac{\varphi}{100} \cdot p_{\text{н}}.$$

Давление насыщенного водяного пара в воздухе [10]:

$$p_{\text{н}} = 0,6112 \cdot \exp \frac{17,504 \cdot T_{\text{ос}}}{241,2 + T_{\text{ос}}}.$$

Объемная концентрация влаги в воздухе [10]:

$$W_{\text{ос}} = \frac{d}{1+d} \cdot \frac{\mu_{\text{вл.в}}}{\mu_{\text{в}}}.$$

Влагосодержание влажного воздуха [10]:

$$d = 0,6112 \cdot \frac{p_{\text{вп}}}{p_{\text{вл.в}} - p_{\text{вп}}}.$$

Интенсивность массоотдачи на поверхности изоляции определялась по формуле [11]:

$$j = \frac{(p_{\text{вп}} - p_{\text{н.пов}})}{k}.$$

Давление насыщенного водяного пара на поверхности изоляции [10]:

$$p_{\text{н.пов}} = 0,6112 \cdot \exp \frac{17,504 \cdot T_{\text{пов}}}{241,2 + T_{\text{пов}}}.$$

Коэффициент массоотдачи [12]:

$$\beta = \frac{\alpha}{C_{\text{вл.в}} \cdot \rho_{\text{вл.в}}}.$$

Теплоёмкость влажного воздуха [10]:

$$C_{\text{вл.в}} = \frac{(C_{\text{св}} + d \cdot C_{\text{в}})}{(1+d)}.$$

Плотность влажного воздуха [10]:

$$\rho_{\text{вл.в}} = \frac{0,00348}{T_{\text{ос}}} (p_{\text{вл.в}} - 0,376 \cdot p_{\text{вп}}).$$

Обозначения:  $R$  – граница области расчета;  $\xi$  – координата границы фазового перехода, м;  $T$  – температура, К;  $W$  – относительное объемное влагосодержание изоляции;  $a$  – коэффициент теплопроводности, м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время, с;  $r$  – координата, м;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $C$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $j$  – плотность потока массы, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $Q$  – теплота фазового перехода, кДж/кг;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;  $k$  – сопротивление влагообмену, (кПа·с·м<sup>3</sup>)/кг;  $p$  – давление, Па;  $d$  – влагосодержание, (кг. влаги)/(кг. сухого воздуха);  $\mu$  – молярная масса, кг/кмоль;  $\bar{\rho} = (\rho_{\text{в}} + \rho_{\text{н}})/2$  – средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{W} = (W_{\text{в}} + W_{\text{н}})/2$  – среднее относительное влагосодержание изоляции по объёму.

Индексы: 1, 2 – номера границ области расчета; 0 – начальный момент времени; ос – окружающая среда; ж – холодная жидкость, пл – плавление (кристаллизация), эф – эффективный, пар – парообразование (конденсация), л – лед, н – насыщение, в – вода, атм – атмосферный, вп – водяной пар, вл.в – влажный воздух, св – сухой воздух, парц – парциальный, пов – поверхность, и – изоляция.

#### Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(10) решена методом конечных разностей [13] с использованием метода прогонки

по неявной разностной схеме и метода «ловли фронта в узел пространственной сетки». Особенности решения задачи заключались в наличии дополнительных слагаемых в выражениях (7) и (10), а также разрыве теплофизических характеристик на границе фазового перехода.

В качестве примера рассматривался типичный объект для хранения сжиженного углеводородного газа — аппарат диаметром 2400 мм [6]. В качестве изоляционного материала выбран полистирол ПС-1 толщиной 50 мм [6]. Температура внутренней границы  $R_1$  равна температуре криожидкости в резервуаре  $T_{ж}=230$  К [14]. Температура окружающей среды варьировалась в диапазоне  $T_{oc}=290...300$  К, относительная влажность воздуха  $\varphi=60...100$  %, атмосферное давление  $p_{атм}=101325$  Па, начальная объемная влажность изоляции  $W_0=1$  % [3]. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности изоляции в соответствии с [11] принимался равным  $\alpha=5,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), сопротивление теплообмену у поверхности изоляции составляло  $k=96$  (МПа·с·м<sup>2</sup>)/кг [11], коэффициент диффузии влаги в полистироле ПС-1  $D_2=2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/ч [4].

В табл. 1 приведены значения теплофизических характеристик [3, 5, 10] веществ и материалов, использовавшихся при проведении численного моделирования.

**Таблица 1.** Теплофизические свойства материалов и веществ

Характеристика	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$C$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Вода	0,6	4186	994,04
Лед	2,4	1924	916,8
Полистирол ПС-1	0,0342	1183	100

#### Результаты численного моделирования

Основные результаты численного моделирования тепломассопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей в условиях миграции влаги к фронту промерзания влажной теплоизоляции приведены в табл. 2 и на рис. 2. В табл. 2 приведены величины теплопритоков к резервуару с учетом  $q_1$  и без учета  $q_2$  промерзания тепловой изоляции, сравнение этих величин между собой  $\delta_1$ , погрешность по балансу энергии  $\delta_2$ , значения толщины слоя промерзшей изоляции  $\delta$ , объемное содержание влаги в атмосферном воздухе  $W_{oc}$  и время выхода процессов на стационарный режим  $t_{ст}$  при различных значениях температуры окружающей среды  $T_{oc}$  и относительной влажности воздуха  $\varphi$ .

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток и выполнения условий баланса энергии  $\delta_2$  на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии  $\delta_2$  во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что является приемлемым при проведении исследований тепловых режимов резервуаров для хранения криожидкостей.

Сопоставление результатов математического моделирования с известными данными работ других авторов по исследованию тепломассопереноса в низкотемпературной изоляции [4] позволяет говорить о приемлемом качественном согласовании результатов для задач с конденсацией влаги на внешнем контуре изоляции и задач влагопереноса в изоляционном слое. Анализ литературы по исследованию тепломассопереноса в тепловой защите резервуаров для хранения криожидкостей свидетельствует о том, что задача о промерзании увлажненной изоляции холодильного оборудования до настоящего момента времени была не решена, так как подобный режим работы холодильной изоляции считается заведомо аварийным [4]. По этой причине провести детализированное сопоставление результатов моделирования тепловых режимов резервуаров для хранения криожидкостей в условиях промерзания слоя изоляции и наличия миграции влаги к фронту с результатами исследований других авторов не представляется возможным.

**Таблица 2.** Результаты численного моделирования

$T_{oc}$ , К	$\varphi$ , %	$q_1$ , Вт/м	$q_2$ , Вт/м	$W_{oc}$ , %	$\delta$ , мм	$\delta_1$ , %	$\delta_2$ , %	$t_{ст}$ , ч
290	60	447,6	282,6	1,14	44,7	36,9	0,36	21
	80	456,7		1,53	43,7	38,1	0,28	52
	100	466,8		1,91	42,7	39,5	0,25	56
295	60	479,7	306,1	1,56	41,6	36,2	0,34	72
	80	492,2		2,09	40,2	37,8	0,31	130
	100	511,0		2,61	39,0	40,1	0,36	138
300	60	516,7	329,7	2,11	38,5	36,2	0,24	149
	80	539,1		2,82	36,8	38,8	0,34	248
	100	563,4		3,54	35,2	41,5	0,26	309

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2, позволяют говорить об ожидаемом увеличении теплопритоков к резервуару с ростом температуры окружающей среды  $T_{oc}$ , относительной влажности воздуха  $\varphi$  и количества содержащейся в структуре изоляции влаги и льда.

Результаты расчета потерь холода (табл. 2) свидетельствуют о том, что увлажнение и последующее промерзание слоя тепловой изоляции приводят к росту потерь холода на  $\delta_1=36,2...41,5$  % в рассматриваемом диапазоне изменения  $T_{oc}$  и  $\varphi$ . Соотношение величин  $q_1$  и  $q_2$  позволяет утверждать, что при эксплуатации резервуаров для хранения криожидкостей даже при относительно невысоких значениях  $T_{oc}$  и  $\varphi$  возможно существенное увеличение теплопритоков к рассматриваемым объектам.

Следует также отметить, что в рамках рассматриваемой задачи толщина слоя промерзшей тепловой изоляции имеет максимальное значение  $\delta=44,7$  мм (табл. 2), что соответствует практически полному промерзанию теплоизоляционного покрытия рассматриваемого объекта. Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что толщина слоя промерзшей изоляции заметно из-

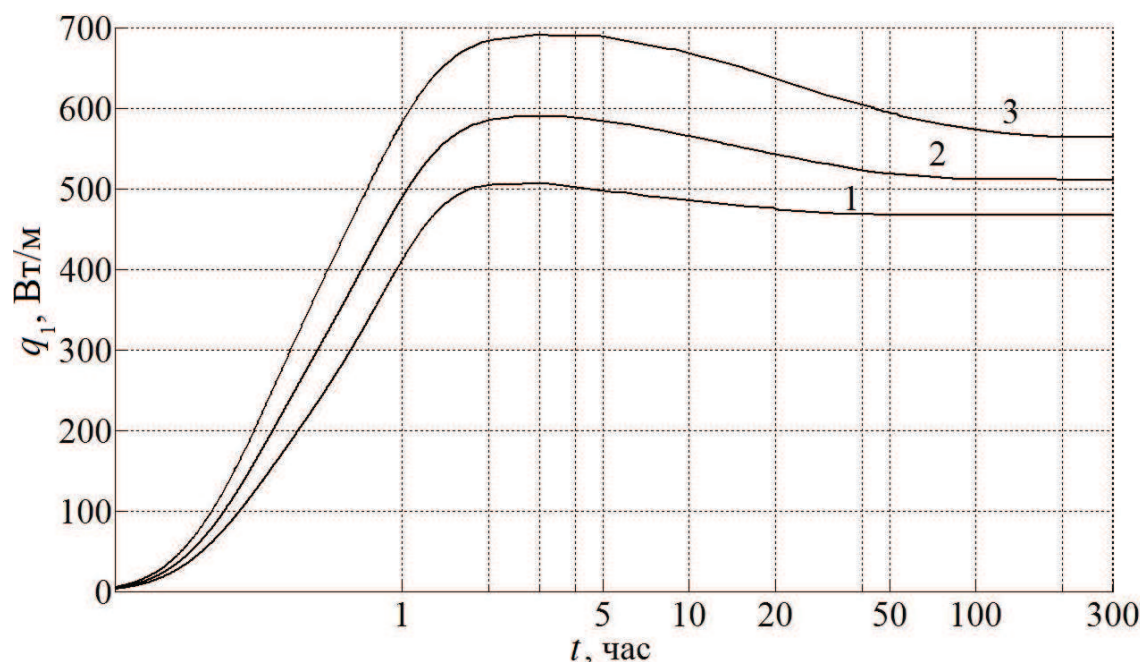


Рис. 2. Изменение теплопритоков к резервуару во времени: 1 – 290; 2 – 295; 3 – 300 К.

меняется (в пределах 20 %) в зависимости от значений  $T_{oc}$  и  $\phi$ . Эти обстоятельства обуславливают необходимость учета нестационарности процессов переноса и возможного промерзания слоя тепловой изоляции при проектировании и анализе тепловых режимов работы резервуаров для хранения криожидкостей.

На рис. 2 приведены величины теплопритоков к резервуару в зависимости от времени при температуре окружающей среды  $T_{oc}=290...300$  К, значении относительной влажности воздуха  $\phi=100$  %.

Анализ нестационарности процессов переноса в холодильной изоляции из полистирола ПС-1 свидетельствует о том, что выход на стационарный режим происходит через  $t_{ст}=21-309$  часов (табл. 2) в зависимости от  $T_{oc}$  и  $\phi$ .

Следует отметить, что процессы тепломассопереноса во влагустойчивой тепловой изоляции (например, полистирол ПС-1) резервуаров для хранения криожидкостей носят существенно нестационарный характер, а изменение величины теплопритоков во времени (рис. 2) можно описать следующим образом. В течение первых 2–4 часов наблюдается резкое повышение потерь холода, а затем, по мере установления стационарного режима, величина тепловых притоков к резервуару снижается вплоть до постоянного значения  $q_1$  (табл. 2). Интенсификация потерь холода в начальный временной промежуток объясняется тем, что в этот период происходит «быстрая» кристаллизация (замерзание) начальной влаги  $W_0$ , содержащейся в тепловой изоляции. Последующее снижение уровня теплопритоков связано с конденсацией влаги из влажно-

го воздуха на внешней границе рассматриваемой системы (рис. 1), диффузией конденсата в структуру слоя тепловой изоляции и плавлением (размораживанием) кристаллической влаги (льда).

Эти обстоятельства подтверждают необходимость учета нестационарности процессов переноса, промерзания тепловой изоляции и наличия миграции влаги к фронту фазового перехода при анализе тепловых режимов работы резервуаров для хранения криожидкостей, имеющих влагустойчивую тепловую изоляцию.

### Выводы

Проведено численное моделирование, и выявлены особенности тепломассопереноса в ограждающих конструкциях резервуара для хранения криожидкостей и численный анализ потерь холода рассматриваемого объекта с учетом промерзания тепловой изоляции, наличия миграции влаги к фронту фазового перехода и конденсации влаги на внешнем контуре взаимодействия.

Установлены масштабы увеличения теплопритоков (до 41,5 %) в рассматриваемой системе вследствие увлажнения, промерзания и наличия фазовых переходов в структуре и на поверхности слоя тепловой изоляции.

Показана необходимость учета нестационарности процессов тепломассопереноса в тепловой защите резервуаров для хранения криожидкостей в условиях реальной эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а и гранта Президента РФ № МК-1652.2013.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Официальный сайт Министерства энергетики РФ. 2013. URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/> (дата обращения: 22.01.2013).
2. Половников В.Ю., Хабибулин А.М. Численное моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей с учетом промерзания тепловой изоляции // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 320. — № 4. — С. 33–36.
3. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. — М.: Машиностроение, 1966. — 275 с.
4. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 193 с.
5. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 28 с.
6. Архаров А.М. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
7. Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — № 8. — С. 26–31.
8. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45. — № 5. — С. 42–50.
9. Курьлев Е.С., Оносовский В.В., Румянцев Ю.Д. Холодильные установки. — СПб.: Политехника, 2004. — 576 с.
10. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. — СПб.: СПбГАХПТ, 1998. — 146 с.
11. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. — М.: Стройиздат, 1973. — 287 с.
12. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 549 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. — М.: Научный мир, 2000. — 316 с.
14. Яковлев Е.И. Тепловые режимы хранилищ сжиженных газов. — СПб.: Недра, 1992. — 182 с.

Поступила 24.01.2013 г.

УДК 536.2:532/533; 532.516

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛОСТИ ОТКРЫТОГО ТИПА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ ВНЕШНЕГО КОНТУРА

А.В. Крайнов

Томский политехнический университет  
E-mail: Lux\_veritatis@mail.ru

Проведено численное исследование сопряжённого теплообмена и гидродинамики при движении вязкой жидкости в открытой прямоугольной полости с учётом процесса её разрушения. Получены гидродинамическая картина течения вязкой жидкости и температурные поля для твёрдой и жидкой фаз. Изучено влияние динамических параметров и геометрических характеристик на формирование контуров образующихся кратеров.

### Ключевые слова:

Сопряжённый теплоперенос, вязкая несжимаемая жидкость, гидродинамика, контур кратера, разрушение полости.

### Key words:

Conjugate heat transfer, viscous incompressible fluid, hydrodynamics, crater contour, cavity damage.

На протяжении последних десятилетий наблюдается устойчивый интерес к исследованию конвективных течений в различных технических комплексах. Полости являются технологическими элементами всевозможных энергетических систем и производственных процессов различного уровня сложности таких отраслей промышленности, как энергетическая, металлургическая, горная, космическая и других, которые представляют собой открытые или закрытые контуры с разной геометрией, перенос тепла в которых осуществляется конвективной циркуляцией теплоносителя [1–5]. Процессы, связанные с изменением фазового состояния при плавлении материала, протекают в условиях аварийных ситуаций, возникающих в энергосистемах разного класса и различной сте-

пени опасности по мере развития опаснейших производств и усложнения технологических циклов в таких отраслях промышленности, как атомная, химическая и других [6, 7].

Рассматривается нестационарное взаимодействие жидкости с полостью (рис. 1). Цель данной работы — исследовать процесс разрушения открытой полости при взаимодействии с вязкой несжимаемой неизотермической жидкостью в условиях охлаждения внешнего контура.

Изучение процесса проводилось с использованием математической модели на основе системы уравнений Навье—Стокса в переменных вихрь ( $\omega$ )—функция тока ( $\psi$ ), уравнения энергии, уравнения теплопроводности для материала полости с соответствующими краевыми условиями