

УДК 621.643

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ КРИОЖИДКОСТЕЙ С УЧЕТОМ ПРОМЕРЗАНИЯ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В.Ю. Половников, А.М. Хабибулин

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

Представлены результаты численного анализа потерь холода вследствие увлажнения и последующего промерзания слоя тепловой изоляции резервуаров для хранения криожидкостей. Показаны масштабы увеличения теплопритоков и обоснована возможность пренебрежения нестационарностью процессов теплопереноса.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, тепловая изоляция, криогенная жидкость, промерзание

Key words:

Mathematical simulation, thermal insulation, cryogenic liquid, freezing.

Введение

Одной из наиболее острых проблем развития топливно-энергетического комплекса России является проблема энергосбережения. От ее успешного решения во многом зависит жизнеспособность экономики страны [1]. Существенную роль в выполнении программы энергосбережения России призвана сыграть высокоэффективная тепловая изоляция, применяемая во всех областях промышленного производства и строительства [2].

Изоляция ограждений холодильных сооружений эксплуатируется в тяжелых условиях, прежде всего из-за непрерывных изменений температуры и влажности наружного воздуха, переменного воздействия солнечной радиации и ветра. Потоки теплоты и влаги не только меняются по величине, но иногда (при относительно высоких температурах в помещениях) и по направлению. Особенностью 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.

Следует отметить, что используемые в настоящее время подходы к расчету тепловой защиты холодильной техники [4] не учитывают многих особенностей эксплуатации рассматриваемых систем. К этим особенностям относятся наличие фазовых переходов, взаимодействие с окружающей средой, нестационарность процессов переноса и др.

Целью данной работы является численное моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей с учетом промерзания тепловой изоляции и анализ тепловых режимов рассматриваемой системы.

Постановка задачи

Рассматривается типичный резервуар для хранения криожидкостей [5]. Для ограждающих конструкций резервуара решается одномерная нестационарная задача теплопроводности с подвижной границей фазового перехода (промерзание влажной теплоизоляции) и учетом зависимости теплофизических свойств изоляции от объемного содержания влаги. На рис. 1 приведено схематическое изображение области решения. На внутренней R_1 и внешней R_2 поверхностях тепловой изоляции резервуара вводятся граничные условия первого и третьего рода соответственно.

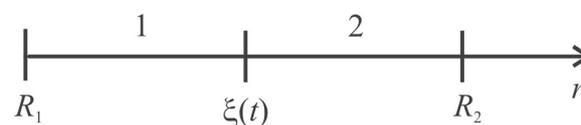


Рис. 1. Схематическое изображение области решения для зон изоляции: 1) промерзшей; 2) увлажненной

Предполагается, что тепловая изоляция резервуара в начальный момент времени находится в увлажненном состоянии и имеет температуру T_0 , равную температуре окружающей среды T_{oc} .

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

- не рассматривается теплоперенос в объеме резервуара и его металлических стенках;
- подвижная граница фазового перехода всегда имеет температуру замерзания $T_{\text{фт}}=273$ К;
- не учитывается конденсация влаги на внешнем контуре взаимодействия;
- значение коэффициента теплоотдачи на наружной границе системы является постоянной и известной величиной.

Принятые допущения, с одной стороны, не накладывают принципиальных ограничений на физическую модель рассматриваемой системы, а с другой — позволяют определенным образом упростить решение поставленной задачи.

Математическая модель

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_{\text{эф1}} \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad R_1 < r < \xi(t); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{\text{эф2}} \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad \xi(t) < r < R_2. \quad (2)$$

Начальное условие:

$$t = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad T = T_0 = \text{const}. \quad (3)$$

Граничные условия:

$$t > 0, \quad r = R_1, \quad T = T_{\text{пов}} = \text{const}; \quad (4)$$

$$t > 0, \quad r = R_2, \quad -\lambda_{\text{эф2}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha(T_2 - T_{\text{ос}}); \quad (5)$$

$$r = \xi(t), \quad T_1 = T_2 = T_{\text{фп}},$$

$$\lambda_{\text{эф1}} \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_{\text{эф2}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = Q \rho_{\text{в}} W_{\text{в}} \frac{d\xi}{dt}. \quad (6)$$

Для перехода к безразмерным переменным использованы следующие соотношения:

$$R = \frac{r}{R_2}, \quad \Xi = \frac{\xi}{R_2}, \quad \tau = \frac{t}{t_0}, \quad \Theta = \frac{T - T_{\text{пов}}}{T_0 - T_{\text{пов}}},$$

$$\text{Fo}_1 = \frac{a_{\text{эф1}} t_0}{R_2^2}, \quad \text{Fo}_2 = \frac{a_{\text{эф2}} t_0}{R_2^2}, \quad \text{Bi} = \frac{\alpha R_2}{\lambda_{\text{эф2}}},$$

$$\text{Ko}_1 = \frac{Q \rho_{\text{в}} W_{\text{в}}}{c_{\text{эф1}} \rho_{\text{эф1}} (T_0 - T_{\text{пов}})}, \quad \text{Ko}_2 = \frac{Q \rho_{\text{в}} W_{\text{в}}}{c_{\text{эф2}} \rho_{\text{эф2}} (T_0 - T_{\text{пов}})}.$$

После перехода к безразмерным переменным математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{1}{\text{Fo}_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R}, \quad R_1 < R < \Xi(\tau); \quad (7)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R}, \quad \Xi(\tau) < R < 1. \quad (8)$$

Начальное условие:

$$\tau = 0, \quad \frac{R_1}{R_2} \leq R \leq 1, \quad \Theta_1 = \Theta_2 = 1. \quad (9)$$

Граничные условия:

$$\tau > 0, \quad R = \frac{R_1}{R_2}, \quad \Theta_1 = 0; \quad (10)$$

$$\tau > 0, \quad R = 1, \quad \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = \text{Bi}(1 - \Theta_2); \quad (11)$$

$$R = \Xi(\tau), \quad \Theta_1 = \Theta_2, \quad \frac{\text{Fo}_1}{\text{Ko}_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} - \frac{\text{Fo}_2}{\text{Ko}_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = \frac{d\Xi}{d\tau}. \quad (12)$$

Значения теплофизических характеристик тепловой изоляции при увлажнении и промерзании рассчитывались как эффективные с учетом объемных долей каждой компоненты. Следует отметить, что объемная доля льда в изоляции вследствие расширения воды при замерзании во всех ва-

риантах численных экспериментов увеличивалась на 9 % [6]. Так, например, эффективные коэффициенты теплопроводности находились из соотношений:

$$\lambda_{\text{эф1}} = W_{\text{л}} \lambda_{\text{л}} + (1 - W_{\text{л}}) \lambda_{\text{и}}, \quad \lambda_{\text{эф2}} = W_{\text{в}} \lambda_{\text{в}} + (1 - W_{\text{в}}) \lambda_{\text{и}},$$

где $W_{\text{л}} = 1,09 W_{\text{в}}$.

Выражение для расчета потерь холода, отнесенных к единице длины, имеет следующий вид:

$$q_l = -\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial r} \frac{F}{l}.$$

Выражение для расчета потерь холода в безразмерном виде:

$$Q_l = -\frac{\partial \Theta}{\partial R}.$$

Обозначения: T – температура, К; Θ – безразмерная температура; t – время, с; t_0 – масштаб времени, с; τ – безразмерное время; r – координата, м; R – безразмерная координата; R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиусы цилиндра, м; ξ – координата границы фазового перехода, м; Ξ – безразмерная координата границы фазового перехода; a – температуропроводность, м²/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); c – теплоемкость, Дж/(кг·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ρ – плотность, кг/м³; Q – теплота фазового перехода, Дж/кг; W – относительное объемное влагосодержание изоляции; q_l – потери холода, Вт/м; F – площадь, м²; l – длина, м; Fo – число Фурье; Bi – число Био; Ko – число Коссовича; Q_l – безразмерный параметр, выражающий потери холода.

Индексы: 0 – начальный момент времени; 1, 2 – промерзшая и непромерзшая зоны изоляции; ос – окружающая среда; пов – внутренняя поверхность изоляции; эф – эффективный; фп – фазовый переход; в – вода; л – лед; и – изоляция.

Метод решения и исходные данные

Рассматриваемая задача решена методом конечных разностей [7]. Разностные аналоги уравнений решались с помощью метода прогонки по неявной разностной схеме [7]. Особенности решения задачи заключались в наличии дополнительного слагаемого в выражениях (6), (12) и разрыве теплофизических характеристик на границе фазового перехода.

В качестве примера рассматривается типичный объект для хранения криожидкостей [5] – аппарат с внутренним диаметром 2400 мм. В качестве изоляционного материала выбран полистирол ПС-1 толщиной 50 мм [5]. Температура внутренней границы R_1 (рис. 1) равна температуре криожидкости в резервуаре $T_{\text{пов}} = 233$ К. Температура окружающей среды варьировалась в диапазоне $T_{\text{ос}} = 290...300$ К, а объемная влажность изоляции $W_{\text{в}} = 0...3$ %. Значение коэффициента теплоотдачи от наружного воздуха к поверхности изоляции во всех вариантах численного анализа принималось равным $\alpha = 5,8$ Вт/(м²·К) [8], а теплота фазового перехода – $Q = 334 \cdot 10^3$ Дж/кг [6].

В табл. 1 приведены значения теплофизических характеристик воды, льда и полистирола ПС-1 [9, 10], использовавшиеся при проведении численного моделирования.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов и веществ

Материал/вещество	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Вода	0,6	4186	994,04
Лед	2,4	1924	916,8
Полистирол ПС-1	0,0343	1188,5	100

Результаты исследования

Основные результаты численного исследования потерь холода в рассматриваемом объекте приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток и выполнения условий баланса энергии δ_2 на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии δ_2 (табл. 2) во всех вариантах численного анализа не превышала 0,2 %, что является приемлемым при проведении исследований тепловых режимов резервуаров для хранения криожидкостей.

Таблица 2. Результаты численного моделирования

T_{oc} , К	W , %	q_l , Вт/м	δ_l , мм	δ_1 , %	δ_2 , %	$t_{ст}$, ч
290	0	266,0	0	–	0,079	3,4
	1	411,8	43,7	35,4	0,135	2,8
	2	554,7	46,8	52,0	0,120	3,1
	3	693,0	48,9	61,6	0,167	3,3
295	0	293,2	0	–	0,077	3,4
	1	440,2	40,8	33,4	0,111	3,0
	2	586,4	44,2	50,0	0,172	3,2
	3	727,6	46,5	59,7	0,143	3,4
300	0	317,3	0	–	0,081	3,4
	1	469,2	38,2	32,4	0,136	3,0
	2	618,3	41,8	48,7	0,078	3,5
	3	762,6	44,4	58,4	0,034	3,8

Анализ результатов исследований (табл. 2) позволяет говорить об ожидаемом увеличении теплопритоков к резервуару с ростом температуры окружающей среды T_{oc} и объемной доли влаги W , содержащейся в структуре изоляции. Результаты расчета потерь холода, табл. 2, свидетельствуют о том, что увлажнение и последующее промерзание слоя тепловой изоляции приводят к росту потерь холода до $\delta_1=61,6$ % для рассматриваемого диапазона изменений T_{oc} и W .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при эксплуатации резервуаров для хранения

криожидкостей даже при относительно невысоких значениях T_{oc} и W возможно существенное увеличение теплопритоков к рассматриваемым объектам. Следует отметить, что в рамках рассматриваемой задачи толщина слоя промерзшей тепловой изоляции имеет максимальное значение $\delta=48,9$ мм (табл. 2), что соответствует практически полному промерзанию теплоизоляционного покрытия рассматриваемого объекта.

На рис. 2 приведены величины теплопритоков к резервуару в зависимости от времени при температуре окружающей среды $T_{oc}=295$ К и значениях относительного объемного влагосодержания изоляции $W=0$ и 3 %.

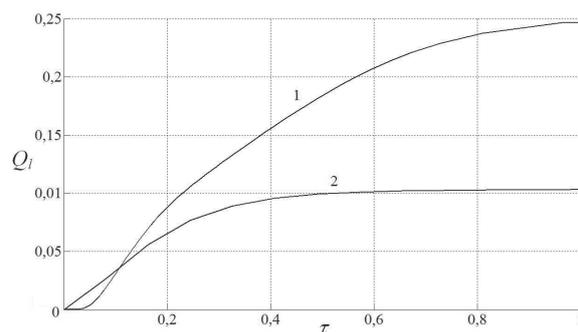


Рис. 2. Зависимость теплопритоков к резервуару от времени при W : 1) 3; 2) 0 %

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе позволяет сделать вывод о том, что длительность выхода на стационарный режим находится в диапазоне $t_{ст}=2,8...3,8$ ч (табл. 2) в зависимости от температуры окружающей среды T_{oc} и объемной доли влаги W . Поскольку типичные времена хранения криожидкостей в резервуарах существенно превышают указанный временной интервал, то нестационарностью процессов теплопереноса в изоляции можно обоснованно пренебречь.

Выводы

1. Проведены моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криогенных жидкостей и численный анализ интенсификации потерь холода с учетом промерзания тепловой изоляции.
2. Установлены масштабы увеличения на 35...60 % теплопритоков вследствие увлажнения и последующего промерзания слоя тепловой изоляции.
3. Выявлено, что нестационарностью процессов теплопереноса в изоляции резервуаров для хранения криожидкостей можно обоснованно пренебречь.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 12-08-00201-а и гранта Президента РФ (проект № МК 1284.2011.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бытенский О.М. Энергосбережение в тепловых сетях систем теплоснабжения // Энергетик. – 2009. – № 5. – С. 25–28.
2. Развитие теплоснабжения в России в соответствии с Энергетической стратегией до 2030 г. // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 2. – С. 6–9.
3. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. – М.: Машиностроение, 1966. – 275 с.
4. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 28 с.
5. Официальный сайт ЗАО «ПЗЭМ». 2011. URL: <http://www.pzem.ru/taxonomy/term/21> (дата обращения: 19.09.2011).
6. Курьлев Е.С., Оносовский В.В., Румянцев Ю.Д. Холодильные установки. – СПб.: Политехника, 2004. – 576 с.
7. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.
8. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1974. – 320 с.
9. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.
10. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.

Поступила 02.11.2011 г.

УДК 621.311.001.57

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СХЕМ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Д.К. Смирнов, Н.Н. Галашов

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

На основе объектного подхода разработан программный комплекс визуального моделирования схем теплоэнергетических установок. Он позволяет автоматизировать процесс моделирования схем из готовых компонентов оборудования и связей, а также создавать новые компоненты и изменять математические модели любых объектов на любом этапе моделирования.

Ключевые слова:

Теплоэнергетическая установка, объектный подход, моделирование, элемент, связь, класс, объект.

Key words:

Heat-and-power engineering, object approach march, modeling, element, connection, class, object.

В настоящее время имеется большое количество как зарубежных, так и отечественных разработок нового энергетического оборудования. К ним относятся парогазовые установки; энергоблоки на суперсверхкритические параметры пара; установки с когенерацией и тригенерацией на ТЭЦ и т. д. Для выбора наиболее надежных, экономичных и маневренных установок требуются сложные трудоемкие расчеты, которые практически невозможно выполнить без современной вычислительной техники и специальных методов математического моделирования.

Имеющиеся в настоящее время работы по математическому моделированию схем теплоэнергетических установок [1–7] разрабатывались без применения объектного подхода (ОП), который появился в современных языках программирования и позволяет значительно усовершенствовать и упростить процесс моделирования, что показано в работе [8]. В существующих программах моделирования жестко определяется набор оборудования, на основе которого моделируется энергоустановка, и для каждого вида оборудования составляется своя система уравнений, которую невозможно изменить без изменения кода основной программы.

Сложным является и процесс связывания объектов схемы в единую систему, для чего применяются специальные математические методы теории графов и матриц. При этом пользователь большую часть времени затрачивает на кодирование связей.

Целью данной работы является применение объектного подхода, что позволяет устранить перечисленные недостатки существующих методик и программ моделирования.

Объектный подход предоставляет следующие важные преимущества [9]: возможность сборки системы из готовых повторно используемых компонент; возможность накапливать теоретические и опытные знания в виде библиотек классов на основе механизма наследования; простоту внесения изменений в проекты за счет использования свойств наследования и полиморфизма; автоматическое связывание объектов системы за счет системы указателей на объекты.

Для моделирования схемы теплоэнергетической установки на основе ОП были выбраны два базовых класса – «элемент» и «связь». Класс «элемент» характеризует компоненты оборудования (парогенераторы, турбины, цилиндры и отсеки турбины, конденсаторы, деаэраторы, подогреватели