

УДК 621.643

В. Ю. Половников, А. М. Хабибулин

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ХОЛОДА РЕЗЕРВУАРАМИ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ КРИОЖИДКОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ КОНДЕНСАЦИИ ВЛАГИ НА ВНЕШНЕМ КОНТУРЕ ИЗОЛЯЦИИ

Представлены результаты численного анализа роста потерь холода вследствие конденсации влаги на внешнем контуре изоляции резервуаров для хранения криожидкостей. Показаны масштабы увеличения теплопритоков, обоснована возможность пренебрежения нестационарностью процессов теплопереноса.

К л ю ч е в ы е с л о в а: математическое моделирование, изоляция, криогенная жидкость, конденсация.

The results of numerical analysis of increase of cooling loss due to condensation on the external isolation contour of tanks for the storage of cryogenic liquids are presented. The authors show the scale of increase in heat influxes and prove the possibility to neglect nonstationary heat transfer processes.

К e y w o r d s: mathematical modeling, isolation, cryogenic liquid, condensation.

Введение. Широкое внедрение низких температур требует серьезного усовершенствования изоляции, защищающей холодную аппаратуру от притока тепла из окружающей среды. Требования к эффективности изоляции низкотемпературного оборудования возрастают по мере понижения температуры, так как при этом, с одной стороны, увеличивается теплоприток через изоляцию, т. е. потери холода, а с другой стороны, резко возрастает стоимость потерь холода.

Кроме того, теплота парообразования различных криожидкостей, отнесенная к единице объема, тем меньше, чем ниже их температуры кипения [1]. Следовательно, небольшое количество тепла вызывает испарение сравнительно большого количества криожидкости с низкой температурой кипения [1]. Отсюда ясно, почему к изоляции для низких температур предъявляются особенно высокие требования по уменьшению тепловых потоков через нее. Эти требования тем выше, чем меньше размеры изолируемого оборудования, т. е. больше его удельная поверхность.

Несмотря на широкое распространение холодильной техники [2—4] и развитую теорию процессов теплообмена в низкотемпературной изоляции [1, 5], действующие в настоящее время правила по проектированию резервуаров для хранения криожидкостей [1, 5—8] не учитывают многих особенностей теплообмена, реализующихся в рассматриваемых объектах. К этим особенностям относятся нестационарность процессов теплообмена, наличие влагообмена с окружающей средой, возможное промерзание слоя изоляции и др.

Имеющиеся публикации по процессам влагопереноса в низкотемпературной изоляции, например [9, 10], базируются на упрощенном аналитическом описании процессов теплообмена в рассматриваемых системах, а рассматриваемые в [9] математические модели в определенной мере далеки от реальных процессов теплообмена, реализующихся в холодильной изоляции. Снижение теплозащитных характеристик низкотемпературной изоляции при наличии увлажнения в процессе эксплуатации в [9] учитывается введением поправочного коэффициента, а возможное промерзание тепловой защиты резервуаров для хранения криожидкостей не учитывается вовсе.

Целью данной работы является математическое моделирование тепло-массопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей и численный анализ потерь холода рассматриваемых объектов с учетом конденсации влаги на внешнем контуре.

Постановка задачи. Рассматривается типичный резервуар для хранения криожидкостей [11]. Для тепловой изоляции резервуара решается одномерная нестационарная задача теплопроводности с учетом фазового перехода на внешней поверхности изоляции.

Внешний контур изоляции резервуара контактирует с влажным воздухом, а влага, содержащаяся в нем, конденсируется на поверхности рассматриваемого объекта. На внутренней R_1 и внешней R_2 границах слоя тепловой изоляции вводятся граничные условия первого и третьего рода соответственно. Предполагается, что тепловая изоляция резервуара в начальный момент времени имеет температуру T_0 , равную температуре окружающей среды T_{oc} .

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

- 1) не рассматривается теплоперенос в объеме резервуара и его металлических стенках;
- 2) температура внутренней поверхности изоляции равна температуре холодной жидкости $T_ж$;
- 3) значение коэффициентов теплоотдачи и сопротивления влагообмену на наружной границе системы являются постоянными и известными величинами.

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

$$C_\rho = \frac{\partial T}{\partial r^2} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), R_1 < r < R_2, \tau > 0, \quad (1)$$

где C — теплоемкость, Дж/(кг · К); ρ — плотность, кг/м³; T — температура, К; r — координата, м; R — граница области расчета; τ — время, с.

Начальные условия:

$$T = T_0, R_1 < r < R_2, \tau > 0. \quad (2)$$

Граничные условия:

$$T = T_ж, r < R_1, \tau > 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_{oc}) - jr_{пар}, r = R_2, \tau > 0, \quad (4)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); j — плотность потока массы, кг/(м² · с); $r_{пар}$ — удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Удельная теплота конденсации рассчитывалась из выражения [12]

$$r_{пар} = 2500,64 - 2,369T_{пар}.$$

Интенсивность массоотдачи на поверхности изоляции определялась по формуле [13]

$$j = \frac{(p_{в.п} - p_{н,2})}{R_{вл}},$$

где $R_{вл}$ — сопротивление влагообмену у поверхности изоляции, кПа · с · м²/кг.

Давление насыщенного водяного пара на поверхности изоляции [12]

$$p_{н,2} = 0,6112 \exp\left(\frac{17,504T_{ос}}{241,2 + T_{ос}}\right).$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе [12]

$$p_{в.п} = \frac{\varphi}{100} p_{н.в},$$

где φ — относительная влажность воздуха, %.

Давление насыщенного водяного пара в воздухе [12]

$$p_{н.в} = 0,6112 \exp\left(\frac{17,504T_{ос}}{241,2 + T_{ос}}\right).$$

Индексы: 0 — начальный момент времени; 1, 2 — номера границ области расчета; ос — окружающая среда; ж — жидкость; пар — парообразование (конденсация); н — насыщение; в — воздух; в. п — водяной пар.

Метод решения и исходные данные. Задача, выраженная уравнениями (1—4), решена методом «конечных разностей» с использованием неявной разностной схемы, а разностные аналоги уравнений (1—4) — с помощью методов «прогонки» и простой итерации [13].

В качестве примера рассматривается типичный объект для хранения сжиженного углеводородного газа — аппарат диаметром 2400 мм [11]. В качестве изоляционного материала выбраны шлаковая вата и полистирол ПС-1 толщиной 50 мм [11]. Температура внутренней границы R_1 равна температуре криожидкости в резервуаре $T_{ж} = 230$ К [6—8]. Температура окружающей среды варьировалась в диапазоне $T_{ос} = 290 \dots 300$ К, относительная влажность воздуха $\varphi = 60 \dots 100$ %, атмосферное давление $p = 101325$ Па. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности изоляции в соответствии с [14] составлял $\alpha = 5,8$ Вт/(м² · К), сопротивление влагообмену у поверхности изоляции принималось равным $R_{вл} = 96$ МПа · с · м²/кг [15].

Теплофизические характеристики изоляции [16], использовавшиеся при проведении численного моделирования, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Теплофизические характеристики изоляции

Вид изоляции	λ , Вт/(м · К)	C , Дж/(кг · К)	ρ , кг/м ³
Шлаковая вата	0,0426	702	100
Полистирол ПС-1	0,0342	1183	100

Результаты численного анализа. Основные результаты численного исследования теплопритоков через ограждающие конструкции резервуаров для хранения криожидкостей в условиях конденсации влаги из влажного воздуха приведены в табл. 2—3 для шлаковой ваты и полистирола ПС-1 соответственно.

Т а б л и ц а 2

*Результаты численного моделирования
при применении изоляции из шлаковой ваты*

T_{oc}, K	$\varphi, \%$	$q_1, Вт/м$	$q_2, Вт/м$	$W_{oc}, \%$	$j \cdot 10^6, г/(м^2 \cdot с)$	$\delta_1, \%$	$\delta_2, \%$	$\tau_{ст}, ч$
290	60	343,3	343,3	1,14	—	—	0,26	1,7
	80	350,2		1,53	2,8	2,0	0,19	
	100	357,4		1,91	5,8	3,9	0,18	
295	60	371,9	371,9	1,56	—	—	0,26	
	80	381,3		2,09	3,8	2,5	0,18	
	100	390,4		2,61	7,6	4,7	0,17	
300	60	401,2	400,5	2,11	0,2	0,2	0,21	
	80	412,8		2,82	5,0	3,0	0,18	
	100	424,0		3,54	9,7	5,5	0,16	

Т а б л и ц а 3

*Результаты численного моделирования
при применении изоляции из полистирола ПС-1*

T_{oc}, K	$\varphi, \%$	$q_1, Вт/м$	$q_2, Вт/м$	$W_{oc}, \%$	$j \cdot 10^6, г/(м^2 \cdot с)$	$\delta_1, \%$	$\delta_2, \%$	$\tau_{ст}, ч$
290	60	282,6	282,6	1,14	—	—	0,30	2,8
	80	286,3		1,53	1,9	1,3	0,24	
	100	292,2		1,91	4,8	3,3	0,23	
295	60	306,1	306,1	1,56	—	—	0,30	
	80	311,3		2,09	2,6	1,7	0,23	
	100	318,7		2,61	6,3	4,0	0,22	
300	60	329,7	329,7	2,11	—	—	0,30	
	80	336,6		2,82	3,4	2,1	0,22	
	100	345,6		3,54	8,0	4,6	0,28	

В табл. 2—3 приняты следующие обозначения: величины теплопритоков к резервуару с учетом q_1 и без учета q_2 конденсации на поверхности изоляции; сравнение этих величин между собой δ_1 ; погрешность по балансу энергии δ_2 ; объемное содержание влаги в атмосферном воздухе W_{oc} ; время выхода процессов на стационарный режим $\tau_{ст}$ при различных значениях T_{oc} и φ .

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 (см. табл. 2—3) на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии δ_2 (см. табл. 2—3) 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 [9, 17—19] позволяет говорить о приемлемом качественном согласовании результатов для задачи с конденсацией влаги на внешнем контуре изоляции.

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2, 3, свидетельствуют о том, что длительность выхода процессов теплопереноса на стационарный режим при использовании изоляции из шлаковой ваты составляет 1,7 ч, а для изоляции из полистирола ПС-1 — 2,8 ч. При этом $\tau_{ст}$ не зависит от значений T_{oc} и φ .

Результаты моделирования подтверждают ожидаемый рост холодопотерь рассматриваемой системы с увеличением температуры, относительной влажности окружающего воздуха и теплопроводности изоляционного материала.

Конденсация влаги на поверхности низкотемпературной изоляции приводит к ожидаемому росту теплопритоков к резервуару, который составляет до 5,5 % для резервуара, изолированного шлаковой ватой, и до 4,6 % для резервуара, изолированного полистиролом ПС-1 в зависимости от состояния окружающей среды. Принимая во внимание то обстоятельство, что относительно небольшое увеличение теплопритоков к объему резервуара может привести к испарению сравнительно большого количества криожидкости [1], можно сделать вывод о необходимости учета интенсификации потерь холода, связанных с конденсацией влаги на поверхности изоляции при проведении моделирования тепловых режимов резервуаров для хранения криогенных жидкостей.

Результаты численного исследования холодопотерь, приведенные в табл. 2—3, обработаны методом наименьших квадратов. Получены зависимости для расчета потерь холода рассматриваемой системы в зависимости от T_{oc} при фиксированных значениях φ .

Выражения для расчета теплопритоков при использовании шлаковой ваты в условиях отсутствия промерзания и увлажнения изоляции имеют следующий вид:

$$q_1(\varphi = 60 \%) = 0,014 T_{oc}^2 - 2,47 T_{oc} - 117,8; \quad (5)$$

$$q_1(\varphi = 80 \%) = 0,008 T_{oc}^2 + 1,54 T_{oc} - 769,2; \quad (6)$$

$$q_1(\varphi = 100 \%) = 0,012 T_{oc}^2 - 0,42 T_{oc} - 530. \quad (7)$$

Выражения для расчета теплопритоков при использовании полистирола ПС-1 в условиях отсутствия промерзания и увлажнения изоляции:

$$q_1(\varphi = 60 \%) = 0,002 T_{oc}^2 + 3,53 T_{oc} - 909,3; \quad (8)$$

$$q_1(\varphi = 80 \%) = 0,006 T_{oc}^2 + 1,49 T_{oc} - 650,4; \quad (9)$$

$$q_1(\varphi = 100 \%) = 0,008 T_{oc}^2 + 0,62 T_{oc} - 560,4. \quad (10)$$

Выражения (5—10) справедливы при $290 \leq T_{oc} \leq 300$, $60 \leq \varphi \leq 100$. Промежуточные значения q_1 можно вычислить, используя формулы линейной интерполяции.

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2 и 3, показали, что наиболее интенсивный рост холодопотерь наблюдается в первые 1...1,5 ч эксплуатации резервуара, поэтому нестационарностью процессов теплопереноса в рамках математической модели (1—4) можно обоснованно пренебречь. Для расчета величин потерь холода резервуаров для хранения криожидкости в условиях конденсации влаги из влажного воздуха можно использовать выражения (5—10).

Заключение. Проведено математическое моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей и численный анализ потерь холода рассматриваемого объекта с учетом конденсации влаги на внешнем контуре взаимодействия с окружающей средой.

Установлены масштабы увеличения теплопритоков в рассматриваемой системе вследствие конденсации влаги на внешнем контуре.

Показано, что в условиях конденсации влаги на поверхности изоляции нестационарностью процессов теплопереноса можно пренебречь, а рост теплопритоков составляет до 5,5 % для резервуара, изолированного шлаковой ватой, и до 4,6 % для резервуара, изолированного полистиролом ПС-1 в зависимости от состояния окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коганер М. Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. М. : Машиностроение, 1966. 275 с.
2. Богданов С. Н. Холодильная техника. Свойства веществ : справочник. СПб. : Машиностроение, 1999. 166 с.
3. Курьлев Е. С., Оносовский В. В., Румянцев Ю. Д. Холодильные установки. СПб. : Политехника, 2004. 576 с.
4. Чумак И. Г. Холодильные установки. М. : Агропромиздат, 1991. 495 с.
5. Архаров А. М. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. М. : Машиностроение, 1999. 720 с.
6. Яковлев Е. И. Тепловые режимы хранилищ сжиженных газов. СПб. : Недра, 1992. 182 с.
7. Рачевский Б. С. Сжиженные углеводородные газы. М. : Нефть и газ, 2009. 640 с.
8. Преображенский Н. И. Сжиженные углеводородные. Л. : Недра, 1975. 279 с.
9. Петров-Денисов В. Г., Масленников Л. А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. М. : Энергоатомиздат, 1983. 193 с.
10. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. М. : Высшая школа, 1970. 376 с.
11. Официальный сайт ЗАО «ПЗЭМ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pzem.ru/taxonomy/term/21> (дата обращения : 02.08.2012).
12. Бурцев С. И., Цветков Ю. Н. Влажный воздух. Состав и свойства. СПб. : СПбГАХИТ, 1998. 146 с.
13. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
14. Ильинский В. М. Строительная теплофизика. М. : Высшая школа, 1974. 320 с.
15. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М. : Стройиздат, 1973. 287 с.
16. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах : справочник. М. : Машиностроение, 1975. 216 с.
17. Масленников Л. А., Доннер М. С. Натурные исследования пенопластовой теплоизоляции низкотемпературного трубопровода // Сборник трудов ВНИПИ Теплопроект. 1974. Вып. 27. С. 89—95.

18. Масленников Л. А., Петров-Денисов В. Г., Доннер М. С. Стенды для исследования тепло- и массопереноса в низкотемпературной тепловой изоляции // Сборник трудов ВНИПИ Теплопроект. 1972. Вып. 21. С. 127—131.

19. Тепло- и массообмен в низкотемпературной атмосферной теплоизоляции / В. Г. Петров-Денисов, Л. А. Масленников, И. Б. Заседателев, М. С. Доннер // Сборник трудов ВНИПИ Теплопроект. 1975. Вып. 35. С. 79—88.

1. *Kaganer M. G.* Teplovaya izolyatsiya v tekhnike nizkikh temperatur. M. : Mashinostroenie, 1966. 275 s.

2. *Bogdanov S. N.* Kholodil'naya tekhnika. Svoystva veshchestv : spravochnik. SPb. : Mashinostroenie, 1999. 166 s.

3. *Kurylev E. S., Onosovskiy V. V., Rummyantsev Yu. D.* Kholodil'nye ustanovki. SPb. : Politekhnika, 2004. 576 s.

4. *Chumak I. G.* Kholodil'nye ustanovki. M. : Agropromizdat, 1991. 495 s.

5. *Arkharov A. M.* Kriogennye sistemy: osnovy proektirovaniya apparatov, ustanovok i sistem. M. : Mashinostroenie, 1999. 720 s.

6. *Yakovlev E. I.* Teplovye rezhimy khranilishch szhizhennykh gazov. SPb. : Nedra, 1992. 182 s.

7. *Rachevskiy B. S.* Szhizhennye uglevodorodnye gazy. M. : Neft' i gaz, 2009. 640 s.

8. *Preobrazhenskiy N. I.* Szhizhennye uglevodorodnye. L. : Nedra, 1975. 279 s.

9. *Petrov-Denisov V. G., Maslennikov L. A.* Protsesty teplo- i vlagoobmena v promyshlennoy izolyatsii. M. : Energoatomizdat, 1983. 193 s.

10. *Bogoslovskiy V. N.* Stroitel'naya teplofizika. M. : Vysshaya shkola, 1970. 376 s.

11. Ofitsial'nyy sayt ZAO «PZEM» [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.pzem.ru/taxonomy/term/21> (data obrashcheniya : 02.08.2012).

12. *Burtsev S. I., Tsvetkov Yu. N.* Vlazhnyy vozdukh. Sostav i svoystva. SPb. : SPbGAKhPT, 1998. 146 s.

13. *Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N.* Vychislitel'naya teploperedacha. M. : Editorial URSS, 2003. 784 s.

14. *Il'inskiy V. M.* Stroitel'naya teplofizika. M. : Vysshaya shkola, 1974. 320 s.

15. *Fokin K. F.* Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy. M. : Stroyizdat, 1973. 287 s.

16. *Novitskiy L. A., Kozhevnikov I. G.* Teplofizicheskie svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh : spravochnik. M. : Mashinostroenie, 1975. 216 s.

17. *Maslennikov L. A., Donner M. S.* Naturnye issledovaniya penoplastovoy teploizolyatsii nizkotemperaturnogo truboprovoda // Sbornik trudov VNIPI Теплопроект. 1974. Вып. 27. С. 89—95.

18. *Maslennikov L. A., Petrov-Denisov V. G., Donner M. S.* Stendy dlya issledovaniya teplo- i massoperenosa v nizkotemperaturnoy teplovooy izolyatsii // Sbornik trudov VNIPI Теплопроект. 1972. Вып. 21. С. 127—131.

19. Тепло- и массообмен в низкотемпературной атмосферной теплоизоляции / В. Г. Петров-Денисов, Л. А. Масленников, И. Б. Заседателев, М. С. Доннер // Sbornik trudov VNIPI Теплопроект. 1975. Вып. 35. С. 79—88.

© Половников В. Ю., Хабибулин А. М., 2013

Поступила в редакцию
в декабре 2012 г.

Ссылка для цитирования:

Половников В. Ю., Хабибулин А. М. Численный анализ потерь холода резервуарами для хранения криожидкостей в условиях конденсации влаги на внешнем контуре изоляции // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 1(25). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PolovnikovKhabibulin-2013_1\(25\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PolovnikovKhabibulin-2013_1(25).pdf)