

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ВЫСОКОПОРИСТОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В.Ю. Половников, А.М. Хабибулин

Научный руководитель: к.т.н. В.Ю. Половников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: polov@tpu.ru

**HEAT AND MASS TRANSFER IN A HIGH-POROUS LOW-TEMPERATURE THERMAL
INSULATION IN REAL OPERATING CONDITIONS**

V.Yu. Polovnikov, A.M. Habibulin

Scientific Supervisor: Ph.D., V.Yu. Polovnikov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: polov@tpu.ru

***Annotation.** The results of numerical simulation of heat and mass transfer in a high-porous low-temperature insulation in conditions of insulation freezing, a moisture migration to the front of phase transition and a condensation forming on an outer contour of interaction were obtained. Values of heat leakage were established.*

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 [1]. Накопление влаги в теплоизоляционных конструкциях низкотемпературного оборудования может привести к столь значительному увеличению потерь холода, что необходима будет их полная замена [1].

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

Рассматривается типичный резервуар для хранения криожидкостей [1]. 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. Внешний контур изоляции резервуара контактирует с влажным воздухом, а влага, содержащаяся в нем, конденсируется на поверхности рассматриваемого объекта. Влагоперенос происходит только в талой (увлажненной) зоне путем миграции влаги к фронту промерзания. Для задачи теплопроводности на внутренней и внешней границах слоя тепловой изоляции вводятся граничные условия первого и третьего рода соответственно. Для задачи переноса влаги на границе фазового перехода выставляется условие идеальной гидроизоляции, а на внешнем контуре взаимодействия условие массообмена поверхности с окружающей средой (влажный воздух). В начальный момент времени температура и относительное влагосодержание изоляции по объёму равны постоянным величинам. Предполагается, что начальная температура равна температуре окружающей среды, а температура

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

внутренней поверхности изоляции равна температуре холодной жидкости, которая ниже температуры замерзания. В результате охлаждения изоляции образуется промерзший слой переменной толщины, причем подвижная граница фазового перехода всегда имеет постоянную температуру замерзания. Предполагается, что перенос тепла в изоляции происходит только вследствие теплопроводности. Математическая модель и метод решения рассматриваемой задачи аналогичны модели и задаче описанным в [1].

В качестве примера рассматривался типичный объект для хранения сжиженного углеводородного газа – аппарат диаметром 2400 мм [2]. В качестве изоляционного материала выбрана шлаковая вата толщиной 50 мм [2]. Температура внутренней границы равна температуре криожидкости в резервуаре 230 К. Температура окружающей среды варьировалась в диапазоне $T_{oc}=290-300$ К, относительная влажность воздуха $\varphi=60-100$ %. Сопротивление влагообмену у поверхности изоляции составляло 96 (МПа·с·м²)/кг, коэффициент диффузии влаги $1,5 \cdot 10^{-3}$ м²/ч.

Основные результаты численного моделирования тепломассопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей в условиях миграции влаги к фронту промерзания влажной теплоизоляции приведены в таблице. В таблицах приведены величины теплопритоков к резервуару с учетом q_1 и без учета q_2 промерзания тепловой изоляции, сравнение этих величин между собой δ_1 , погрешность по балансу энергии δ_2 , значения толщины слоя промерзшей изоляции δ , 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 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 на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии δ_2 во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что является приемлемым при проведении исследований тепловых режимов резервуаров для хранения криожидкостей.

Таблица

Результаты численного моделирования

T_{oc} , К	φ , %	q_1 , Вт/м	q_2 , Вт/м	W_{oc} , %	δ , мм	δ_1 , %	δ_2 , %	$t_{ст}$, ч
290	60	500,7	343,3	1,14	45,0	31,4	0,49	1,5
	80	512,6		1,53	44,1	33,0	0,34	2,1
	100	524,9		1,91	43,1	34,6	0,30	2,3
295	60	538,7	371,9	1,56	41,8	31,0	0,50	1,8
	80	557,5		2,09	40,6	33,3	0,30	2,5
	100	572,7		2,61	39,3	35,1	0,45	2,7
300	60	582,0	400,5	2,11	38,7	31,2	0,35	2,1
	80	606,1		2,82	37,1	33,9	0,46	2,7
	100	633,0		3,54	35,6	36,7	0,36	3,5

Сопоставление результатов математического моделирования с известными данными работ других авторов по исследованию тепломассопереноса в низкотемпературной изоляции [3] 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 исследованиям

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 [3]. По этой причине провести 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.

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

Результаты расчета потерь холода, свидетельствуют о том, что увлажнение и последующее промерзание слоя тепловой изоляции приводят к росту потерь холода на $\delta_1 = 31,0\text{--}36,7\%$ в рассматриваемом диапазоне изменения T_{oc} и ϕ . Соотношение величин q_1 и q_2 , позволяет утверждать о том, что при эксплуатации резервуаров для хранения криожидкостей даже при относительно невысоких значениях T_{oc} и ϕ возможно существенное увеличение теплопритоков к рассматриваемым объектам.

Следует также отметить, что, в рамках рассматриваемой задачи, толщина слоя промерзшей тепловой изоляции имеет максимальное значение $\delta=45,0$ мм, что соответствует практически полному промерзанию теплоизоляционного покрытия рассматриваемого объекта. Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что толщина слоя промерзшей изоляции заметно изменяется (в пределах 20 %) в зависимости от значений T_{oc} и ϕ . 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.

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе позволяет сделать вывод о том, что время выхода на стационарный режим находится в диапазоне $t_{cr}=1,5\text{--}3,5$ часа в зависимости от значений температуры окружающей среды T_{oc} и относительной влажности воздуха ϕ . При этом наиболее интенсивный рост теплопритоков к резервуару наблюдается в течение первого часа эксплуатации, что существенно ниже типичного времени хранения криожидкостей в резервуарах [2]. Несмотря на этот факт, нестационарность процессов теплопереноса в тепловой защите резервуаров для хранения криожидкостей в условиях реальной эксплуатации необходимо учитывать, поскольку отказ от учета этого обстоятельства не позволит оценить толщину слоя промерзшей изоляции и соответственно вычислить действительные потери холода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Архаров А.М. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. – М.: Машиностроение, 1999. – 720 с.
3. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 193 с.