

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Научная статья

УДК 536-34; DOI: 10.61260/2304-0130-2024-3-25-31

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЖАРА

✉ Кузьмин Анатолий Алексеевич;

Романов Николай Николаевич;

Габиева Кристина Николаевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ kaa47@mail.ru

Аннотация. Цель исследования – нахождение закономерностей процесса сопряженного теплопереноса в замкнутом пространстве пары коаксиальных цилиндров при воздействии внешнего источника теплового излучения в рамках модели свободной конвекции. Предполагено, что приоритетным видом теплопередачи в газе, наполняющем коаксиальное пространство, принята турбулентная свободная конвекция, в наружной теплоизоляции трубопровода – теплопроводность. Сформирована модель процесса свободной конвекции в коаксиальной газовой полости при наличии локального нагрева в виде системы дифференциальных уравнений. Приведены сравнительные результаты натурального и численного эксперимента по измерению эффективного коэффициента теплопроводности экранно-вакуумной изоляции.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, коаксиальный двустенный трубопровод, экранно-вакуумная изоляция, свободная конвекция, коаксиальное пространство

Для цитирования: Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Габиева К.Н. Численная модель свободной конвекции в пространстве экранно-вакуумной изоляции при тепловом воздействии пожара // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2024. № 3. С. 25–31. DOI: 10.61260/2304-0130-2024-3-25-31.

Введение

Современные технологические процессы обычно предусматривают перемещение сжиженного природного газа (СПГ) от пунктов его приема до производственных цехов по внутризаводским трубопроводам, конструкция которых предполагает возможность поддерживать СПГ в жидком состоянии. В работах [1, 2] проанализировано влияние тепловой изоляции на испарение сжиженного природного газа при транспортировке по трубопроводам. Одним из технических решений минимизации тепловых притоков при сохранении допустимой величины потерь напора является использование коаксиального двустенного трубопровода с экранно-вакуумной изоляцией [3, 4]. Одно из возможных конструктивных решений представлено на рис. 1.

Экранно-вакуумная изоляция конструктивно стала дальнейшим развитием высоковакуумной изоляции для уменьшения интенсивности лучистой составляющей теплового притока и ограничения производительности процесса выкипания СПГ в ходе его транспортировки [5].

Необходимо заметить, что не удалось обнаружить значимых источников, обобщающих теоретико-экспериментальные работы, направленные на формирование физических моделей процессов теплопереноса в замкнутом пространстве со значимыми локальными источниками теплового излучения в сопряженных постановках, которые бы учитывали специфическую форму исследуемого пространства и другие наиболее существенные факторы.



Рис. 1. Участок криогенного трубопровода с экранно-вакуумной изоляцией

Существуют несколько решений, например, в работах [6, 7] рассмотрены похожие задачи свободной конвекции на основе учета тепловосприятия по внешнему контуру исследуемого объема цилиндрической формы. Однако эти результаты получены для условий, имеющих существенные различия с условиями тепловосприятия при внешнем воздействии продуктов горения на пожаре. В значительной степени это обусловлено сложностями в нахождении результатов аналитического или численного решения уравнения Навье-Стокса для разреженных газов и отсутствием эмпирических и полуэмпирических закономерностей в определении значений коэффициентов теплообмена на границах раздела сред в граничных условиях третьего рода [8].

Основная часть

Целью настоящей работы является нахождение закономерностей процесса сопряженного теплопереноса в замкнутом пространстве пары коаксиальных цилиндров (рис. 2) при воздействии внешнего источника теплового излучения в рамках модели свободной конвекции.

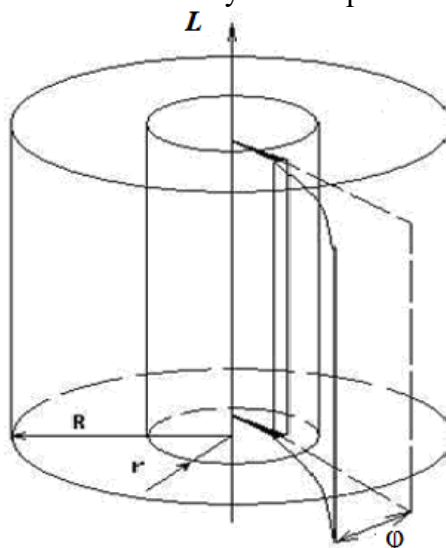


Рис. 2. Схема исследуемого коаксиального пространства

Исследуемая область представляет собой полость с незначительным давлением газа, ограниченную от внешней среды теплопроводящими стенками конечной толщины и известными радиационными показателями. Интенсивность теплового излучения предполагается равномерно распределенной по внешнему контуру экранно-вакуумной изоляции трубопровода. Приоритетным видом теплопередачи в газе, наполняющем коаксиальное пространство, принята турбулентная свободная конвекция, в наружной теплоизоляции трубопровода – теплопроводность.

Для описания процесса свободной конвекции в анализируемом пространстве принята математическая модель, представляющая собой систему дифференциальных уравнений, разработанную для описания смешанной конвекции при наличии локального нагрева [9].

Учитывая принятую для решения задачи цилиндрическую систему координат, в качестве масштаба рассматриваемого диапазона решения были выбраны наружный радиус коаксиальной газовой полости R_{max} и полная окружность 2π . Для преобразования переменных в системе дифференциальных уравнений к безразмерному виду применялись соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{r}{R_o}; \varphi = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}; \tau = \frac{t}{t_o}; U = \frac{u}{V_o}; V = \frac{v}{V_o}; \Theta = \frac{T - T_o}{\Delta T}; \Psi = \frac{\psi}{\psi_o}; \\ \Omega = \frac{w}{w_o}; V_o = \sqrt{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L}; \Delta T = T_{it} - T_o; \psi_o = V_o \cdot L; w_o = \frac{V_o}{L} \end{array} \right\},$$

где r, φ – цилиндрические координаты; u, v – скорости по цилиндрическим координатам; R, φ – безразмерные цилиндрические координаты; τ – безразмерная временная координата; t – временная координата; t_o – масштаб временной координаты; U, V – безразмерные скорости по цилиндрическим координатам; θ – безразмерная температура; T – текущая температура; T_o – температура воздуха в пространстве до начала пожара; T_{it} – масштаб текущей температуры; ψ – показатель газового тока; ψ_o – масштаб показателя газового тока; w – вихревое значение скорости; w_o – масштаб вихревого значения скорости; Ω – безразмерное значение скорости газового тока.

Система дифференциальных уравнений, описывающих процесс свободно конвекции в коаксиальной газовой полости при наличии локального нагрева, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{Sh} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial r} + V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{Gr}} \cdot \Omega \right) \right] + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{Gr}} \cdot \Omega \right) \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r}; \\ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} = -2 \cdot \Omega; \quad \frac{1}{Fo} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \varphi^2}; \\ \frac{1}{Sh} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial r} + V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \varphi} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{Pr \cdot \sqrt{Gr}} \cdot \Theta \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\left(\frac{1}{Pr \cdot \sqrt{Gr}} \cdot \Theta \right) \right] \end{array} \right\}. \quad (1)$$

В выражении (1) приняты следующие обозначения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Число Струхалы} : Sh = \frac{V_o \cdot t_o}{l_o}; \text{число Грасгофа} : Gr = \beta \cdot \frac{g \cdot l_o^3}{\nu^2} \Delta T; \\ \text{число Фурье} : Fo = \frac{a \cdot t_o}{l_o^2}; \text{число Прандля} : Pr = \frac{\nu}{a} \end{array} \right\}.$$

Решение системы дифференциальных уравнений (1), описывающих процесс свободной конвекции, предполагает задание краевых условий. При этом начальные условия представлены уравнениями (2):

$$\psi(r, \varphi, 0) = \Omega(r, \varphi, 0) = 0; \quad \Theta(r, \varphi, 0) = 0. \quad (2)$$

Для диапазона решений (3) на внешнем периметре коаксиального пространства экранно-вакуумной изоляции граничные условия представлены уравнениями (4):

$$\frac{\partial \Theta(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} = 0; \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = 0, \quad 0 < r < R, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_o}; \\ \varphi = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}, \quad 0 < r < R, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_o} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Для диапазона решений (5) на внешнем периметре коаксиального пространства экранно-вакуумной изоляции граничные условия представлены уравнениями (6):

$$\frac{\partial \Theta(r, \varphi, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r = 0, \quad 0 < \varphi < \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_o}; \\ r = 1, \quad 0 < r < R, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_o} \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Для диапазона решений (7) на внутреннем периметре коаксиального пространства экранно-вакуумной изоляции граничные условия представлены уравнениями (8):

$$\frac{\partial \psi(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_1(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} = \lambda_{1,2} \cdot \frac{\partial \Theta_2(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi}; \quad \Theta_1(r, \varphi, \tau) = \Theta_2(r, \varphi, \tau). \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi}, \quad 0 < r < R, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_o}. \quad (8)$$

Для диапазона решений (9) на внутреннем периметре коаксиального пространства экранно-вакуумной изоляции граничные условия представлены уравнениями (10):

$$\frac{\partial \psi(r, \varphi, \tau)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_1(r, \varphi, \tau)}{\partial r} = \lambda_{1,3} \cdot \frac{\partial \Theta_3(r, \varphi, \tau)}{\partial r}; \quad \Theta_1(r, \varphi, \tau) = \Theta_3(r, \varphi, \tau). \quad (9)$$

$$r = \frac{l_o}{R}, \quad 0 < \varphi < 2 \cdot \pi, \quad 0 < \tau < \frac{t}{t_o}. \quad (10)$$

Учет радиационной составляющей для диапазона решений (5) на внешнем периметре коаксиального пространства экранно-вакуумной изоляции описывается дифференциальным уравнением (11) в граничных условиях:

$$\frac{\partial \Theta_1(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} = \frac{\partial \Theta_2(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} + \frac{q \cdot l_o^3}{\lambda \cdot \Delta T} \quad (11)$$

В работе [9] показано, что второе слагаемое правой части уравнения (11) представляет собой критерий Кирпичева Ki .

Учет радиационной составляющей теплового притока, а также влияния вторичных вихревых образований предполагает наличие описания температурной зависимости теплофизических характеристик газа, наполняющего исследуемое разреженное пространство экранно-вакуумной изоляции в диапазоне температур, представляющих практический интерес для прогнозирования поведения коаксиального двустенного трубопровода с СПГ в условиях пожара.

Процессы теплопереноса в газовых средах, связанные с взаимодействием отдельных молекул, развиваются в зависимости от величины давления такой среды. Это касается процессов диффузии, вязкости, теплопроводности и не касается процессов радиационного теплопереноса в случае использования многослойных экранов в конструкции экранно-вакуумной изоляции СПГ трубопроводов.

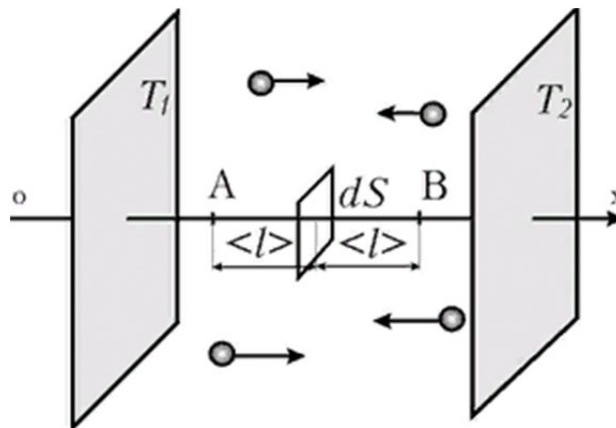


Рис. 3. Схема процесса теплопереноса в разреженных газовых смесях

Учитывая, что значение средней величины свободного пробега l_m у всех молекул приблизительно равны, а величины изохорных молярных теплоемкостей C_v для различных газов также примерно одинаковы, значение коэффициента теплопроводности λ при постоянной концентрации n газовых частиц связано со значением средних скоростей броуновского движения молекул w_m [10].

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot n \cdot w_m \cdot l_m \cdot \frac{C_v}{N_A} = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot w_m \cdot l_m \cdot c_v;$$

$$w_m = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m_o}},$$

где N_a – число Авогадро; ρ – плотность разреженной газовой смеси; m_o – масса молекулы; k – постоянная Больцмана.

Представленная модель свободной конвекции в разряженном пространстве экранно-вакуумной изоляции трубопровода с СПГ была реализована применением потенциала программного комплекса MathWorks MATLAB & Simulink. Результаты численного моделирования для температурного диапазона, позволяющего оценить корректность представленной модели, отображены на рис. 4.

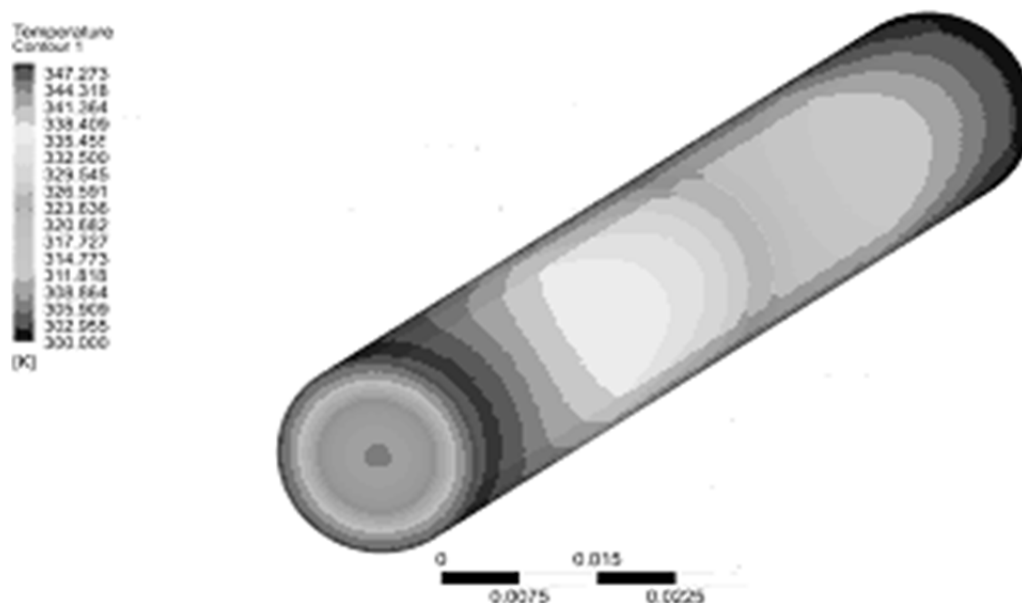


Рис. 4. Графическое отображение температурного поля при внешнем тепловом воздействии на экранно-вакуумную изоляцию трубопровода с СПГ

Для оценки адекватности сформированной модели рассматривался процесс теплопередачи через прослойку толщиной 32 мм и давлением воздуха 2 мбара с тремя слоями алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм со степенью черноты 0,2. На рис. 5 отображены данные по измерению эффективного значения коэффициента теплопроводности экранно-вакуумной изоляции, приведенные в работе [11] – кривая 1, и данные компьютерного моделирования – кривая 2.

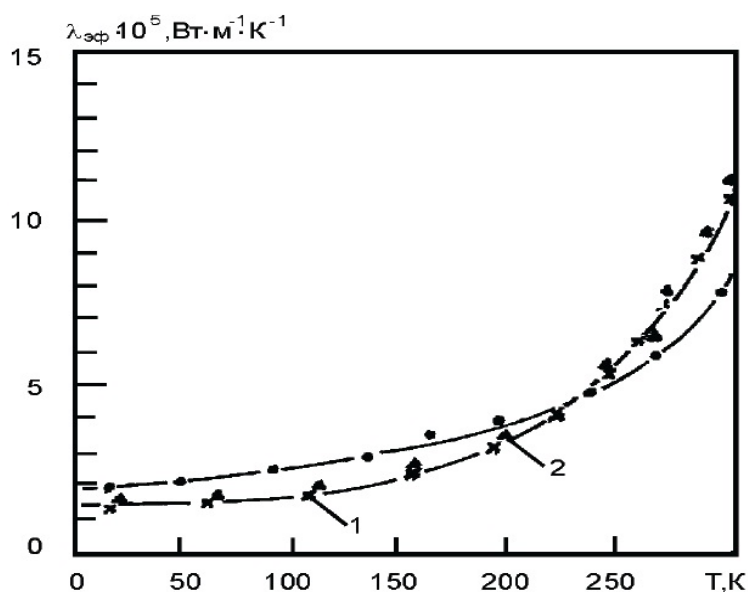


Рис. 5. Результаты натурального и численного экспериментов по исследованию эффективности экранно-вакуумной изоляции

Заключение

Результаты сравнения натурального и численного эксперимента дает основание полагать, что сформированная модель адекватно отражает физические процессы, протекающие в экранно-вакуумной изоляции трубопроводов СПГ при воздействии на них потока тепла.

Список источников

1. Аникин Н.С. Оценка влияния тепловой изоляции на испарение сжиженного природного газа при транспортировке по трубопроводам // *Инновационная наука*. 2019. № 5. С. 16–19.
2. Иванов Л.В., Анохин А.В. Сравнение теплоизоляционных систем для СПГ-трубопроводов // *Инновационное развитие технологий производства СПГ: сб. статей Всерос. науч. конф. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина*, 2019. С. 42–45.
3. Vacuum insulated pipe solutions. LNG // Chart. 2015. URL: http://files.chartindustries.com/20881221_LNG_VIP_Solutions_Catalog_Final_Ir.pdf (дата обращения: 02.01.2021).
4. Cengel Yu.A., Chajar A.J. Heat and Mass Transfer. Fundamentals and Applications. 4th ed. New York: McGraw_Hill, 2015. 905 p.
5. Баранов И.В. Многослойная вакуумная суперизоляция // *Холодильная техника и кондиционирование*. 2016. № 3. С. 36–47.
6. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Сопряженный теплоперенос в замкнутой области с локально сосредоточенным источником тепловыделения // *Инженерно-физический журнал*. 2006. Т. 79. № 1. С. 56–63.
7. Лыков А.В., Алексашенко А.А., Алексашенко В.А. Сопряженные задачи конвективного теплообмена Минск: Наука и техника, 1971. 346 с.
8. Минкин Д.Ю., Федоров А.В., Романов Н.Н. Теплофизические закономерности развития пожарной опасности на промышленных предприятиях и нефтегазовых объектах: монография. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2018. 464 с.
9. John H. «NASA Tech Briefs». URL: <http://www.techbriefs.com/component/content/article/5050> (дата обращения: 12.07.2021).
10. Теплопроводность жидкостей и газов / Н.Б. Вагафтик [и др.]. М.: Стандарты, 1978. 472 с.
11. Жунь Г.Г. Исследование экранно-вакуумной изоляции с новыми материалами // *Энергосбережение – энергетика – энергоаудит*. 2012. № 8 (102). С. 59–63.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 20.06.2024; принята к публикации: 29.08.2024

Информация об авторах:

Кузьмин Анатолий Алексеевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: kaa47@mail.ru, SPIN-код: 3604-7853

Романов Николай Николаевич, доцент кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik57nik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8254-9424>, SPIN-код: 4828-4313

Габиева Кристина Николаевна, обучающийся Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: gabievak@icloud.com