

Ульяна Юрьевна ШАСТУНОВА¹
Дарья Андреевна ДМИТРИЕВСКАЯ²

УДК 536.24.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РЕЗЕРВУАРА С НЕФТЕПРОДУКТАМИ В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ

¹ старший преподаватель
кафедры Механики многофазных систем,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
u.y.shastunova@utmn.ru

² студент бакалавриата, Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
darya.dmitrievskaya@mail.ru

Аннотация

В статье изложены результаты исследования температурного режима резервуара с горячими нефтепродуктами в зимнее время. Авторами приведены схема экспериментальной установки, результаты измерений температуры нефти и температуры в газовом пространстве внутри резервуара, схема теплообмена резервуара с окружающей средой и система дифференциальных уравнений, описывающая передачу тепла от горячего теплоносителя в окружающую среду через ограждающую конструкцию резервуара. Также была создана программа для численного моделирования теплообмена резервуара с окружающей средой и отмечено удовлетворительное согласие экспериментальных и полученных при помощи численных расчетов результатов.

Ключевые слова

Стальной резервуар, нефть, мерзлый грунт, газовое пространство, температура.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-26-33

Цитирование: Шастунова У. Ю. Исследование температурного режима резервуара с нефтепродуктами в зимнее время / У. Ю. Шастунова, Д. А. Дмитриевская // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 1. С. 26-33.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-26-33

Резервуары для нефти и нефтепродуктов эксплуатируются в различных климатических зонах при разных положительных температурах нефтепродуктов. Знание температурного режима резервуара необходимо как для решения задачи о колебании температуры газового пространства внутри резервуара и определения потерь нефтепродуктов, так и для установления температурного перепада в конструктивных элементах при расчете их на прочность и трещиностойкость.

Температурный режим резервуаров определяется целым рядом факторов, многие из которых с трудом поддаются строгому учету, поэтому для получения достоверной информации необходимо использовать как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Актуальность настоящей работы определяется необходимостью обеспечения длительной устойчивости резервуаров в условиях хранения горячего теплоносителя в виде нефти и нефтепродуктов.

Методика математического моделирования процессов теплообмена резервуаров с окружающей средой подробно изложена в статье [1]. Для сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными нами была создана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 1.

На мерзлый грунт, представленный среднезернистым песком, устанавливалась модель стального резервуара, в которую при помощи насоса подавался горячий теплоноситель (нефть) до определенной высоты налива. Вся система помещалась в климатическую камеру, внутри которой поддерживалась постоянная отрицательная температура.

Резервуар представлял собой вертикальный цилиндрический сосуд диаметром 520 мм и высотой 400 мм. Под резервуаром расположен слой теплоизоляции, выполненный из листа фольгоизолон толщиной 4 мм. Для перекачки горячего теплоносителя применялся реверсивный насос ROVER Pompe BE-M 20. Производительность насоса 1700 л/час.

Автоматизированная система измерения температуры включала в себя цифровые датчики температуры DS18B20, персональный компьютер, COM адаптер

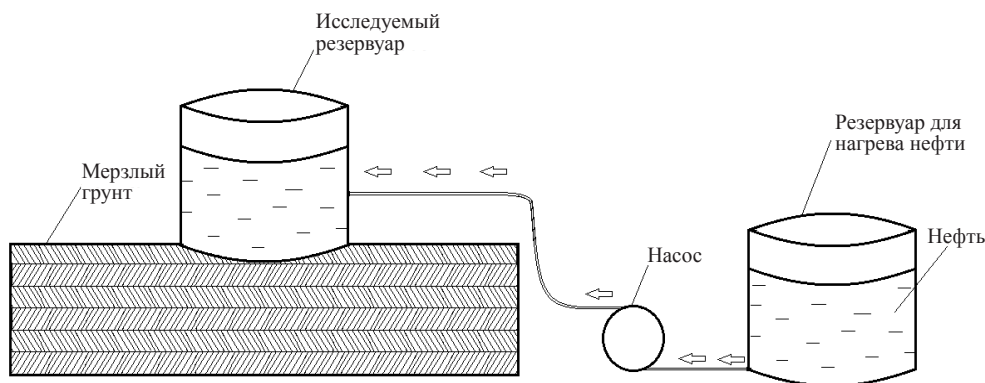


Рис 1. Схема экспериментальной установки

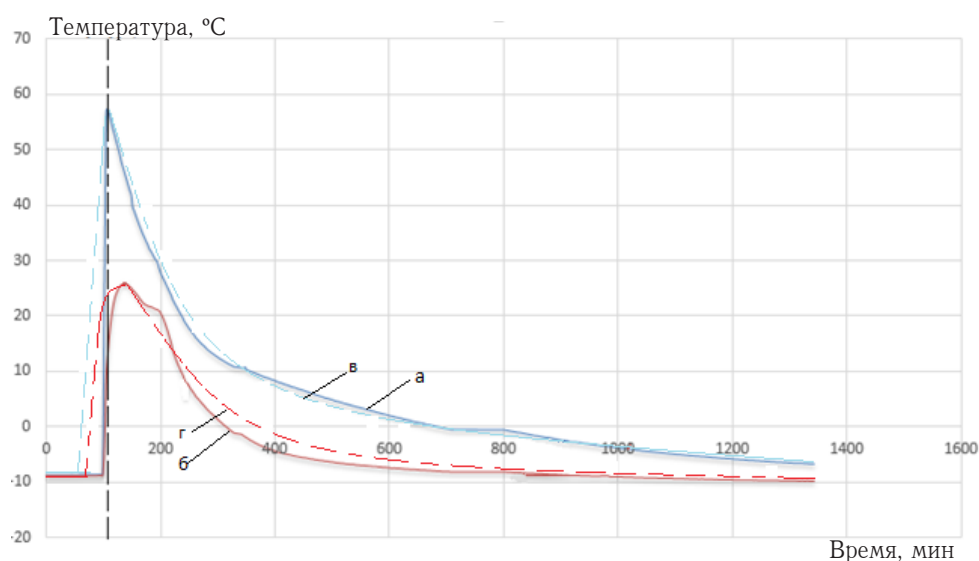


Рис. 2. Изменение температурного режима резервуара с течением времени:
 а, б — экспериментальные кривые; в, г — численное решение;
 а, в — кривые изменения температуры нефти в резервуаре;
 б, г — кривая изменения температуры газового пространства

однопроводной сети 1-Wire и стабилизированный источник питания. Внутри резервуара на входе, в области газового пространства и на стенках были установлены цифровые датчики температуры.

Целью данного эксперимента было получить зависимости изменения температуры газового пространства (T_g) и горячего теплоносителя (T_l) с течением времени. Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

Вертикальной прерывистой линией на графике обозначен раздел двух режимов эксперимента: слева от линии — режим закачки, справа от линии — режим выстаивания горячего теплоносителя в резервуаре.

Температура окружающего воздуха в климатической камере была равна -10°C . В начале закачки пустого резервуара T_l увеличивалась, нагревая стенки холодного металлического резервуара и достигла значения, до которого была разогрета в резервуаре для нефти, 57°C . В режиме выстаивания T_l уменьшалась по экспоненциальной зависимости [3]. Что касается газового пространства, то T_g в режиме закачки также резко увеличивалась, однако, когда нефть достигла максимальной температуры, в режиме выстаивания температура газового пространства продолжала расти в течение 15-20 минут и, достигнув максимального значения 24°C , начала постепенно уменьшаться. Это объясняется сложной картиной конвективных потоков газа в области газового пространства внутри резервуара.

На рис. 3 представлена схема передачи тепла от горячего теплоносителя в окружающую среду через ограждающую конструкцию резервуара [3; 6].

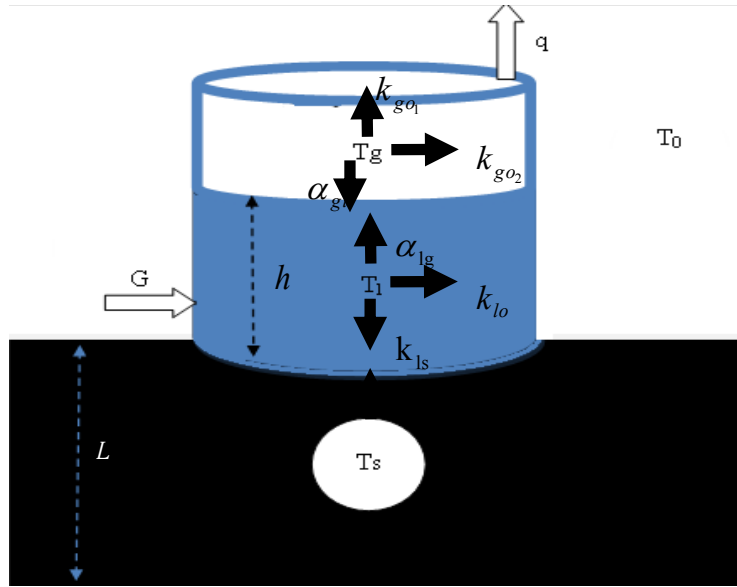


Рис 3. Схема теплообмена резервуара с окружающей средой: индексы g, l, s обозначают соответственно газовую, жидкую и грунтовую составляющие системы

В соответствии с этой схемой, тепловой режим резервуара описывается следующей системой уравнений, включающей в себя уравнение теплового баланса для газового пространства и нефти, уравнение теплопроводности для грунта и закон налива горячего теплоносителя в пустой резервуар [1; 2]:

$$\begin{cases} Q_g = -Q_{g1} + Q_{go1} + Q_{go2} - Q_l \\ Q_l = Q_{l1} + Q_{lo} + Q_{ls} + Q_{lg} \\ \frac{dT_s}{dt} = a_s \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) \\ G = \pi R^2 \cdot \frac{dh}{dt} \end{cases}, (1)$$

$$\begin{aligned} Q_g &= C_g \cdot \rho_g \cdot \pi R^2 \cdot (H - h) \cdot \frac{d(T_g - T_0)}{dt}, & Q_l &= C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2 \cdot (h) \cdot \frac{d(T_l - T_0)}{dt}, \\ Q_{g1} &= C_g \cdot \rho_g \cdot \pi R^2 \cdot (T_g - T_0) \cdot \frac{d(H - h)}{dt}, & Q_{l1} &= C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2 \cdot (T_{lo} - T_l) \cdot \frac{d(h)}{dt}, \\ Q_{go1} &= k_{go1} \cdot (T_g - T_0) \cdot \pi R^2, & Q_{lo} &= k_{lo} \cdot (T_l - T_0) \cdot 2\pi R h, \\ Q_{go2} &= k_{go2} \cdot (T_g - T_0) \cdot 2\pi R \cdot (H - h), & Q_{ls} &= k_{ls} \cdot (T_l - T_s) \cdot \pi R^2, \\ Q_l &= \alpha_{gl} \cdot (T_g - T_l) \cdot \pi R^2, & Q_{lg} &= \alpha_{lg} \cdot (T_l - T_g) \cdot \pi R^2, \end{aligned}$$

где T_0 — температура окружающей среды, К; T_{lo} — температура теплоносителя на входе в резервуар при постоянном расходе G , К; k_{gol} — коэффициент теплопередачи через кровлю резервуара, $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$; k_{go2} — коэффициент теплопередачи через боковую стенку резервуара в области газового пространства, $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$; α_{gl} и α_{lg} — коэффициент теплообмена от газовой смеси к «горячему» теплоносителю и обратно, $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$; k_{lo} — коэффициент теплопередачи через боковую стенку резервуара в области жидкого пространства, $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$; k_{ls} — коэффициент теплопередачи через днище от «горячего» теплоносителя к фундаменту резервуара, $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$; $C_{g,l,s}$ и $\rho_{g,l,s}$ — теплоемкость и плотность газовой смеси, теплоносителя и грунта соответственно, $\frac{Дж}{(кг \cdot K)}$, м; R, H — радиус и высота резервуара, м; h — высота налива теплоносителя, м; G — расход теплоносителя, $\frac{m^3}{c}$; a_s — коэффициент температуропроводности грунта, $\frac{m^2}{c^2}$.

Нахождение коэффициентов теплопередачи подробно указано в [7; 8].

Для упрощения системы вводятся постоянные безразмерные коэффициенты [5]:

$$A_1 = \frac{k_{gol}}{C_g \cdot \rho_g}, B_1 = \frac{2 \cdot k_{go2}}{C_g \cdot \rho_g \cdot R}, C_1 = \frac{\alpha_{gl}}{C_g \cdot \rho_g} \text{ — для газовой области;}$$

$$A_2 = \frac{J}{C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2}, B_2 = \frac{2 \cdot k_{lo}}{C_l \cdot \rho_l \cdot R}, C_2 = \frac{\alpha_{lg}}{C_l \cdot \rho_l}, J = k_{ls} \cdot (T_l - T_s) \cdot \pi R^2 \text{ —}$$

для жидкой области.

При подстановке данных коэффициентов система (1) приводится к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_g}{dt} = T_l \cdot C_1 + T_g \cdot (2N + A_1 + B_1 \cdot (H - h_0 - N\tau) - C_1) - \\ - T_0 \cdot (2N + A_1 + B_1 \cdot (H - h_0 - N\tau)) \\ \frac{dT_l}{dt} = -T_g \cdot \frac{C_2}{H - y} + T_l \cdot \left(\frac{C_2}{H - y} + B_2 - \frac{2N}{H - y} \right) + T_0 \cdot \left(\frac{N}{H - y} - B_2 \right) + \\ + \frac{T_{lo} \cdot N + A_2}{H - y} \\ \frac{dT_s}{dt} = a_s \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dh}{dt} = N = \frac{G}{\pi R^2} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где $y = H - h$, $h_0 = h - N \cdot \tau$.

Начальные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0 \quad h = 0, \quad T_g = T_0, \quad T_l = T_{l0}, \quad J = 0, \\ \text{на } z = 0 \quad T_s = T_0 \end{aligned}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} z > 0, \quad T_s = T_s(z), \\ z = L, \quad T_s = T(L) = \text{const}, \\ k_{ls} \cdot \pi R^2 \cdot (T_l - T_s) = \lambda \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{z=0}. \end{aligned}$$

Аналитическое решение такой системы получить не удалось [4], поэтому были использованы численные методы. Составлена программа численного моделирования для данной системы на основе разностной неявной схемы [5, 9], и выполнены предварительные расчеты, результаты которых (Рис. 2) находятся в удовлетворительном согласии с результатами эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахмат Г. В. Тепловой режим гидравлических испытаний резервуара вертикального стального объемом 20 000 м³. / Г. В. Бахмат, А. А. Кислицын, У. Ю. Шастунова // Вестник Тюменского государственного университета. 2011. № 7. С. 64-72.
2. Гаврильев Р. И. Обобщение взаимосвязи тепловых и физических свойств различных типов грунтов и торфяников / Р. И. Гаврильев // Мерзлые грунты при инженерных воздействиях. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1984. С. 14-28.
3. Кислицын А. А. Основы теплофизики / А. А. Кислицын. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2002. 151 с.
4. Мусакаев Н. Г. Аналитическое решение задачи теплового воздействия факела на многолетнемерзлые породы / Н. Г. Мусакаев, Я. Б. Горелик, С. Н. Романюк // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2013. № 5. С. 124-128.
5. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / А. А. Самарский. М.: Наука, 1971. 553 с.
6. Тугунов П. И. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П. И. Тугунов. Уфа: Дизайн-Полиграф Сервис, 2002. 658 с.
7. Шастунова У. Ю. Расчет системы охлаждения мерзлого грунта под резервуаром с мазутом / У. Ю. Шастунова, Ю. Ф. Янбикова // Достижения и проблемы современной науки: сборник статей международной научно-практической конференции. 2015. С. 48-54.
8. Шастунова У. Ю. Теплопроводность. Конвекция. Излучение. Методические указания по решению задач / У. Ю. Шастунова, М. В. Берляков, А. С. Димитриев, Т. Е. Есенбаев, Д. В. Кичиков, А. В. Курах, И. Р. Поточняк, Н. И. Самсонов, А. Т. Тюльков, Ю. Ф. Янбикова. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2016. 56 с.
9. Kolunin V. S. Heat and Mass Transfer In Saturated Porous Media with Ice Inclusions / V. S. Kolunin, A. V. Kolunin // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49. Pp. 2514-2522.

Uliana Yu. SHASTUNOVA¹
Darya A. DMITRIEVSKAYA²

THE STUDY OF THERMAL REGIME IN OIL TANK DURING THE WINTER SEASON

¹ Senior Lecturer,
Department of Multiphase Systems Mechanics,
Institute of Physics and Technology,
Tyumen State University
u.y.shastunova@utmn.ru

² Student, Institute of Physics and Technology,
Tyumen State University
darya.dmitrievskaya@mail.ru

Abstract

The article presents the results of the study of the thermal regime in the tank with hot oil in winter. The schema of the experimental setup and the results of measurements of oil temperature and the temperature in the gas space inside the tank are demonstrated, and the heat exchange schema of the tank with the environment and the system of differential equations describing the heat transfer from the hot coolant to the environment through the filler structure of the tank are provided. A program for numerical simulation of the tank heat exchange with the environment was created. It is noted that the experimental results are in satisfactory agreement with the results obtained by the means of numerical calculations.

Keywords

Steel tank, oil, frozen ground, the gas space temperature.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-26-33

Citation: Shastunova U. Yu., Dmitriyevskaya D. A. 2016. “The Study of Thermal Regime in Oil Tank during the Winter Season.” Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 1, pp. 26-33.
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-1-26-33

REFERENCES

1. Bakhmat G. V., Kislitsyn A. A., Shastunova U. Yu. 2011. "Teplovoi rezhim gidravlicheskih ispytaniy rezervuara vertikalnogo stalnogo obyemom 20 000 m³" [Thermal Conditions of Hydraulic Test of the Vertical Steel Tank of 20,000 m³ Capacity]. Tyumen State University Herald, no 7, pp. 64-72.
2. Gavril'yev R. I. 1984. "Obobshchenie vzaimosvyazi teplovykh i fizicheskikh svoystv razlichnykh tipov gruntov i torfyanikov" [Generalization of Relationships of Thermal and Physical Properties of Different Types of Soils and Peatlands]. In: Merzlye grunty pri inzhenernykh vozdeistviyakh, pp. 14-28. Novosibirsk: Nauka.
3. Kislitsyn A. A. 2002. Osnovy teplofiziki [Fundamentals of Thermal Physics]. Tyumen: Tyumen State University Publishing House.
4. Musakaev N. G., Gorelik Ya. B., Romanyuk S. N. 2013. "Analiticheskoe reshenie zadachi teplovogo vozdeystviya fakela na mnogoletnemerzlye porody" [Analytical Solution of the Problem of the Thermal Plume Impacts on Permafrost]. Higher Educational Institutions News. Oil and Gas, no 5, pp. 124-128.
5. Samarskiy A. A. 1971. "Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem" [Introduction to the Theory of Difference Schemes]. Moscow: Nauka.
6. Tugunov P. I. 2002. Tipovye raschety pri proektirovani i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov [Model Calculations for the Design and Operation of Tank Farms and Pipelines]. Ufa: Dizain-Poligraf Servis.
7. Shastunova U. Yu., Yanbikova Yu. F. 2015. "Raschet sistemy okhlazhdeniya merzlogo grunta pod rezervurom s mazutom" [Calculation of the Cooling System of the Frozen Soil under the Tank with Fuel Oil]. In: Proceedings of the International Research Conference "Dostizheniya i problemy sovremennoy nauki", pp. 48-54.
8. Shastunova U. Yu., Berlyakov M. V., Dimitriev A. S., Esenbaev T. E., Kichikov D. V., Kurakh A. V., Potochnykh I. R., Samsonov N. I., Tyulkov A. T., Yanbikova Yu. F. 2016. Teploprovodnost. Konvektsiya. Izluchenie. Metodicheskie ukazaniya po resheniyu zadach [Thermal Conductivity. Convection. Radiation. Guidelines for Problem Solving]. Tyumen: Tyumen State University Publishing.
9. Kolunin V. S., Kolunin A. V. 2006. "Heat and Mass Transfer In Saturated Porous Media with Ice Inclusions." International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 2514-2522.