

УДК 532.546

РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С ЭЛЕГАЗОВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ^{1,2}**Хисматуллин А.С., ²Гареев И.М.**¹*ГАНУ «Институт прикладных исследований Республики Башкортостан», Стерлитамак;*²*Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет, Салават, e-mail: hism5az@mail.ru, lsalieval@mail.ru*

Современные промышленные предприятия нефтегазового комплекса представляют собой сложную техническую систему опасных производственных объектов, одним из элементов которой являются пожароопасные силовые масляные трансформаторы, техническое состояние которых влияет на непрерывность и безопасность технологических процессов. В статье найдены решения задач о тепловом поле в параллелепипеде с источником тепла, поддерживающим изменяющуюся со временем температуру в верхнем сечении. Искомая температура представляется в виде суммы стационарной и нестационарной частей, для построения решения которых применен метод разделения переменных. На основе найденного решения произведены расчеты пространственно-временных зависимостей температуры применительно к масляным трансформаторам с элегазовым охлаждением. Полученное решение задачи предназначено для определения эффективной теплопроводности, температуропроводности, коэффициента теплоотдачи, на основе результатов измерения температуры в установке. Такая возможность обеспечивается на основе использования решений прямых задач в алгоритмах обратных задач на основе метода деления отрезка пополам и метода наименьших квадратов.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, метод разделения переменных, трансформатор, барботаж, система охлаждения, элегаз

CALCULATION OF THREE-DIMENSIONAL TEMPERATURE FIELDS IN OIL TRANSFORMERS WITH GAS-COOLED^{1,2}**Khismatullin A.S., ²Gareev I.M.**¹*The state independent scientific institution «Institute of applied researches of Republic Bashkortostan», Sterlitamak;*²*Ufa State Petroleum Technological University, Salavat Branch, Salavat, e-mail: hism5az@mail.ru, lsalieval@mail.ru*

Modern industrial enterprises of oil and gas complex is a complex technical system of hazardous production facilities, one of which elements are a fire hazard of power oil transformers, the technical condition which affects the continuity and safety of technological processes. In this article we find the solution of problems on thermal field in parallelepiped with a heat source that supports changing the temperature in the upper section. The required temperature is represented as a sum of stationary and non-stationary parts, to build the solution which is applied the method of separation of variables. Based on the solutions calculated spatiotemporal dependences of temperature with respect to oil transformers with gas-cooled. The obtained solution of the problem is to determine the effective thermal conductivity, thermal diffusivity, heat transfer coefficient, based on the results of measuring the temperature in the installation. Such possibility is based on the use of solutions of direct problems in the algorithms of the inverse problems on the basis of the method of halving and method of least squares.

Keywords: heat equation, method of separation of variables, transformer, bubbling, cooling, gas

Современные промышленные предприятия нефтегазового комплекса представляют собой сложную техническую систему опасных производственных объектов, одним из элементов которой являются пожароопасные силовые масляные трансформаторы, техническое состояние которых влияет на непрерывность и безопасность технологических процессов. На предприятиях нефтегазового производства отказ силовых масляных трансформаторов может привести к созданию аварийных ситуаций, сопровождающихся значительным экономическим и экологическим ущербом. Для оценки технического состояния масляных трансформаторов в настоящее время применяется

целый комплекс методов и средств, использующих различные диагностические параметры, одним из важнейших факторов, влияющих на надёжность функционирования силовых трансформаторов, является их эффективное охлаждение [1–2]. Существующие системы охлаждения силовых масляных трансформаторов имеют недостатки. Трансформаторное масло охлаждается с помощью радиаторов и вентиляторов крайне неэффективно.

В работах [7–13] предложена система охлаждения масляного трансформатора с применением всплывающих пузырьков газа. В качестве охлаждающего газа предлагается использовать элегаз, который

характеризуется высоким коэффициентом теплового расширения и высокой плотностью. При высоком коэффициенте теплового расширения легко образуется конвективный поток, перераспределяющий тепловые потоки.

Измерение нестационарного температурного поля при наличии всплывающих пузырьков элегаза и их отсутствии позволяет определить эффективный коэффициент [3–5]. К сожалению, теории тепловых процессов, которая могла бы быть использована для определения коэффициента теплопроводности, нет.

Постановка задачи. Рассмотрим температурное поле в прямоугольном параллелепипеде, ограниченном по координатам x , y и z соответственно $0 < x < d/2$, $0 < y < b/2$, $0 < z < l$.

При пропуске пузырьков элегаза [7–10], неравномерной нагрузке трансформатора и интенсивном теплообмене в среде обеспечить постоянство температуры на поверхности трансформаторного масла затруднительно. Температурное поле находится путем решения уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t};$$

$$0 < x < d/2, 0 < y < b/2, 0 < z < l, t > 0. \quad (1)$$

$$v(x, y, z, t) = v_n(0)u(x, y, z, t) + \int_0^t \frac{\partial v_n(\tau)}{\partial \tau} u(x, y, z, t - \tau) d\tau, \quad (7)$$

тогда задача для функции u примет вид

$$\frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}; \quad (8)$$

$$u|_{t=0} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=d/2} + hu \Big|_{x=d/2} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=b/2} + hu \Big|_{y=b/2} = 0; \quad (11)$$

$$u|_{z=0} = 1; \quad u|_{z=l} = 0. \quad (12)$$

Решение задачи представляется в виде

$$u(x, y, z, t) = 16 \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(\chi_n d/2) \sin(\mu_m b/2) \cos(\chi_n x) \cos(\mu_m y)}{(\chi_n d + \sin(\chi_n d)) (\mu_m b + \sin(\mu_m b))} \times \right. \\ \left. \times \left\{ e^{-\sqrt{\chi_n^2 + \mu_m^2} \cdot z} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\pi k \sin\left(\frac{\pi k}{l} z\right) e^{-a(\chi_n^2 + \mu_m^2 + (\pi k/l)^2) t}}{(\chi_n^2 + \mu_m^2) l^2 + \pi^2 k^2} \right\} \right]. \quad (13)$$

Начальное условие не изменяется:

$$T|_{t=0} = T_0. \quad (2)$$

Предположим, что температура на поверхности трансформаторного масла зависит от времени по заданной зависимости, которая измеряется экспериментально:

$$T|_{z=0} = T_n(t). \quad (3)$$

Для безразмерной температуры

$$v = \frac{T - T_0}{\Delta T} = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0},$$

где T_{\max} – максимальная температура, математическую постановку задачи представим в виде

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right),$$

$$0 < x < d/2, 0 < y < b/2, 0 < z < l, t > 0; \quad (4)$$

$$v|_{t=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=d/2} + hv \Big|_{x=d/2} = 0;$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=b/2} + hv \Big|_{y=b/2} = 0; \quad (6)$$

$$v|_{z=0} = v_n(t); \quad v|_{z=l} = 0.$$

Решение задачи представим в виде свертки

Окончательное выражение для температуры запишется в форме

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, t) = & T_0 + 16 \cdot (T_H(0) - T_0) \times \\
 & \times \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(\chi_n d/2) \sin(\mu_m b/2) \cos(\chi_n x) \cos(\mu_m y)}{(\chi_n d + \sin(\chi_n d)) (\mu_m b + \sin(\mu_m b))} \times \right. \\
 & \left. \times \left\{ e^{-\sqrt{\chi_n^2 + \mu_m^2} \cdot z} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\pi k \sin\left(\frac{\pi k}{l} z\right) e^{-a(\chi_n^2 + \mu_m^2 + (\pi k/l)^2)t}}{(\chi_n^2 + \mu_m^2)l^2 + \pi^2 k^2} \right\} \right] + \\
 & + 16 \cdot \int_0^t \frac{\partial(T_H(\tau))}{\partial \tau} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(\chi_n d/2) \sin(\mu_m b/2) \cos(\chi_n x) \cos(\mu_m y)}{(\chi_n d + \sin(\chi_n d)) (\mu_m b + \sin(\mu_m b))} \times \right. \\
 & \left. \times \left\{ e^{-\sqrt{\chi_n^2 + \mu_m^2} \cdot z} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\pi k \sin\left(\frac{\pi k}{l} z\right) e^{-a(\chi_n^2 + \mu_m^2 + (\pi k/l)^2)(t-\tau)}}{(\chi_n^2 + \mu_m^2)l^2 + \pi^2 k^2} \right\} \right] d\tau,
 \end{aligned} \tag{14}$$

где χ_n и μ_m определяются из соответствующих трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned}
 -\chi_n \sin\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) + h \cos\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) &= 0; \\
 h \cos\left(\mu_m \frac{b}{2}\right) - \mu_m \sin\left(\mu_m \frac{b}{2}\right) &= 0,
 \end{aligned}$$

где $n = 0, 1, 2, \dots, m = 0, 1, 2, \dots$

Полученное решение задачи предназначено для определения эффективной теплопроводности, температуропроводности, коэффициента теплоотдачи, на основе результатов измерения температуры в созданной установке. Такая возможность обеспечивается на основе использования решений прямых задач в алгоритмах обратных задач на основе метода деления отрезка пополам и метода наименьших квадратов.

Для определения коэффициента температуропроводности трансформаторного масла с всплывающими элегазовыми пузырьками по экспериментальным значениям температуры созданы программы [6–7].

Анализ результатов. На рис. 1 представлен график зависимости стационарной температуры от вертикальной координаты z в центре резервуара $x = 0$ м, $y = 0$ м при различных значениях коэффициента теплообмена.

Как видно из рис. 1, температура воды при глубине меньше 0,1 м меняется по линейному закону с глубиной z , дальнейшее изменение температуры соответствует $z > 0,1$ м стремлению к температуре окружающей среды, что также подтверждено экспериментальными из-

мерениями на установке. Анализ графиков позволяет выделить следующие три режима:

- 1) хорошая изоляция установки (температурное возмущение более 1 м);
- 2) средняя изоляция (температурное возмущение около 1 м);
- 3) слабая изоляция (температурное возмущение около 0,1 м).

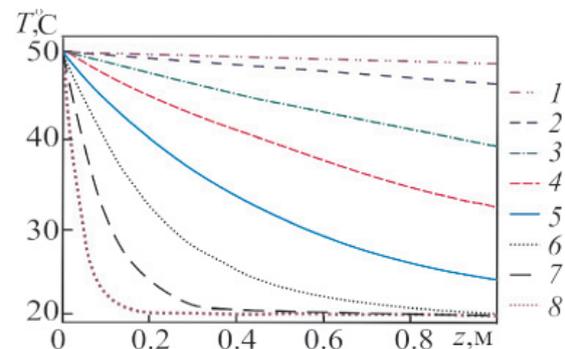


Рис. 1. Распределение стационарной температуры по глубине в центре резервуара при различных значениях параметра теплообмена h :

1 – 0,00005 м⁻¹; 2 – 0,0005 м⁻¹; 3 – 0,005 м⁻¹;
4 – 0,02 м⁻¹; 5 – 0,1 м⁻¹; 6 – 0,5 м⁻¹;
7 – 3 м⁻¹; 8 – 36,8 м⁻¹

Как видно из рис. 2, с увеличением z температура воды уменьшается и стремится на больших глубинах к температуре окружающей среды. Обнаружены невысокие значения разницы температуры между центром и стенками резервуара при одинаковых значениях глубины z .

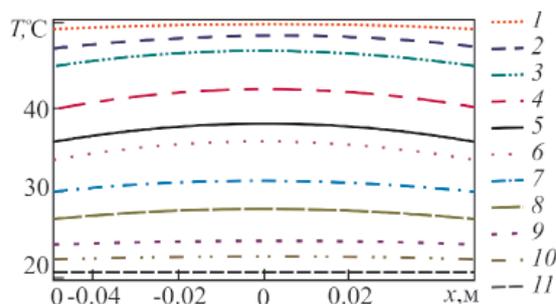


Рис. 2. Зависимости стационарной температуры от горизонтальной координаты x при $y = 0$ м, $h = 6$ м¹ для следующих глубин z : 1 – 0,001 м; 2 – 0,005 м; 3 – 0,01 м; 4 – 0,025 м; 5 – 0,04 м; 6 – 0,05 м; 7 – 0,075 м; 8 – 0,1 м; 9 – 0,15 м; 10 – 0,2 м; 11 – 0,5 м

Выводы

На основе решения задач о температурном поле произведены расчеты пространственно-временных зависимостей температуры применительно к масляным трансформаторам с элегазовым охлаждением и анализ произведенных расчетов.

Список литературы

1. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Хуснутдинова И.Г. Применение барботажа в системе охлаждения силовых трансформаторов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – № 3. – С. 29–32.
2. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Камалов А.Р. Исследование изменения теплопроводности масла при барботаже в системе охлаждения силовых трансформаторов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 338.
3. Нигматулин, Р.И. Трансцилляторный перенос тепла в жидкости с газовыми пузырьками / Р.И. Нигматулин, А.И. Филиппов, А.С. Хисматуллин // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19 – № 5. – С. 595–612.
4. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов: дис. ... д-ра техн. наук / Московский государственный университет инженерной экологии. – М., 2011.
5. Хисматуллин А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса в жидкости с газовыми пузырьками: дис. ... канд. физ.-матем. наук / Башкирский государственный университет. – Уфа, 2010.
6. Хисматуллин А.С., Баширов М.Г., Исаков Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015614072 Программа записи выходных данных эксперимента трансформаторного масла с всплывающими элегазовыми пузырьками. Правообладатель: ФГБОУ ВПО УГНТУ. Дата гос. регистрации 06.04.2015
7. Хисматуллин А.С., Баширов М.Г., Исаков Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015614073 Программа анализа выходных данных эксперимента по определению коэффициента температуропроводности трансформаторного масла с всплывающими элегазовыми пузырьками. Правообладатель: ФГБОУ ВПО УГНТУ. Дата гос. регистрации 06.04.2015.
8. Хисматуллин А.С., Камалов А.Р. Повышение эффективности системы охлаждения мощных силовых трансформаторов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6-2. – С. 316–319.
9. Хисматуллин А.С. Расчет теплового поля в силовых масляных трансформаторах с элегазовым охлаждением // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С. 23–30.
10. Хисматуллин А.С. Исследование теплопереноса в жидкости с газовыми пузырьками. – Изд-во: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH Co. KG, Saarbrücken, Germany, 2011 – С. 132.

11. Хисматуллин А.С., Филиппов А.И., Михайлов П.Н. Фильтрационно-волновой нагрев нефтяного пласта // Инженерная физика. – М.: Научтехиздат, 2006. – № 5. – С. 13–22.
12. Bashirov M.G., Minlibayev M.R., Hismatullin A.S. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers // Oil and Gas Business: electronic scientific journal. – 2014. – Issue 2. – P. 358–367.
13. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // Thermophysics and Aeromechanics. – 2012. – T. 19. – С. 589.

References

1. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Husnutdinova I.G. Primenenie barbotazha v sisteme ohlazhdeniya silovyh transformatorov // Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodornogo syrja. no. 3. pp. 29–32.
2. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Kamalov A.R. Isledovanie izmenenija teploprovodnosti masla pri barbotazhe v sisteme ohlazhdenija silovyh transformatorov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 6. pp. 338.
3. Nigmatulin, R.I. Transcilljatornyj perenos tepla v zhidkosti s gazovymi puzyrkami / R.I. Nigmatulin, A. I. Filippov, A. S. Hismatullin // Teplofizika i aeromehanika. 2012. T. 19 no. 5. pp. 595–612.
4. Mullakaev M.S. Ultrazvukovaja intensifikacija tehnologicheskikh processov dobychi i pererabotki nefti, ochildki neftezagrjaznennyh vod i gruntov // Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk / Moskovskij gosudarstvennyj universitet inzhenernoj jekologii. Moskva, 2011.
5. Hismatullin A.S. Teoreticheskoe i jeksperimentalnoe issledovanie teploperenosa v zhidkosti s gazovymi puzyrkami // Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk / Bashkirskij gosudarstvennyj universitet. Ufa, 2010.
6. Hismatullin A.S., Bashirov M.G., Ishakov R.R. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM no. 2015614072 Programma zapisi vyhodnyh dannyh jeksperimenta transformatornogo masla s vsplyvajushhimi jelegazovymi puzyrkami. Pravoobladatel: FGBOU VPO UGNTU. Data gos. registracii 06.04.2015
7. Hismatullin A.S., Bashirov M.G., Ishakov R.R. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programm dlja JeVM no. 2015614073 Programma analiza vyhodnyh dannyh jeksperimenta po opredelenija koeficienta temperaturoprovodnosti transformatornogo masla s vsplyvajushhimi jelegazovymi puzyrkami. Pravoobladatel: FGBOU VPO UG-NTU. Data gos. registracii 06.04.2015.
8. Hismatullin A.S., Kamalov A.R. Povyshenie jefektivnosti sistemy ohlazhdenija moshnyh silovyh transformatorov. Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 62. pp. 316–319.
9. Hismatullin A.S. Raschet teplovogo polja v silovyh masljanyh transformatorah s jelegazovym ohlazhdeniem / Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodornogo syrja 2015. no. 2. pp. 23–30.
10. Hismatullin A.S. Issledovanie teploperenosa v zhidkosti s gazovymi puzyrkami. Izd-vo: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH Co. KG, Saarbrücken, Germany, 2011 pp. 132
11. Hismatullin A.C., Filippov A.I., Mihajlov P.N. Filtracionno-volnovoj nagrev nefjanogo plasta // Inzhenernaja fizika M.: Nauchtehzdat, 2006g., no. 5, pp. 13–22.
12. M.G. Bashirov, M.R. Minlibayev, A.S. Hismatullin. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers. Oil and Gas Business: electronic scientific journal. 2014, Issue 2, pp. 358–367.
13. Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. T. 19. pp. 589.

Рецензенты:

Жирнов Б.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ХТП, филиал, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават;
 Вильданов Р.Г., д.т.н., профессор кафедры ЭАПП, филиал, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават.