

УДК 532.546

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

^{1,2}Хисматуллин А.С., ²Камалов А.Р.

¹ГАНУ «Институт прикладных исследований Республики Башкортостан»,
Стерлитамак, e-mail: hism5az@mail.ru;

²Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Салават

В настоящее время значительная часть эксплуатируемых мощных силовых трансформаторов отработала нормативный срок службы, установленный заводами-изготовителями. В работе предлагается метод интенсификации системы охлаждения трансформаторного масла на основе представлений о трансцилляторном переносе тепла. Интенсификация процесса теплообмена заключается в том, что теплосъем с нагревающегося масла в трансформаторе осуществляется за счёт циркуляции барботируемого элегаза, перекачиваемого компрессором. После всплытия пузырьков элегаз проходит через систему фильтров, удерживающих частицы масла, захваченные всплывающими пузырьками, и далее, пройдя систему очистки и охлаждения, повторяет рабочий цикл. В теоретических исследованиях для определения эффективного коэффициента трансцилляторного переноса тепла использован метод Зельдовича, дополненный методом редукции к эквивалентному интегро-дифференциальному уравнению при определении температурного поля. Результаты исследований показывают, что при пропускании элегазовых пузырьков через трансформаторное масло происходит возрастание коэффициента эффективной теплопроводности, связанное с трансцилляторным переносом тепла. Предлагаемый метод интенсификации системы охлаждения за счёт увеличения коэффициента переноса тепла в масле позволяет повысить эффективность системы охлаждения силовых масляных трансформаторов.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоотдача, трансцилляторный перенос тепла, элегаз, трансформатор, барботаж, система охлаждения

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE COOLING SYSTEM POWERFUL POWER TRANSFORMERS

^{1,2}Khismatullin A.S., ²Kamalov A.R.

¹State Autonomous Research Establishment «Institute of applied research
of the Republic of Bashkortostan», Sterlitamak, e-mail: hism5az@mail.ru;

²Salavat branch of State Educational Institution of Higher Professional Education
«Ufa State Petroleum Technical University», Salavat

Currently, a significant portion of the exploited powerful power transformers used standard life, factory-installed izgotovityami. V paper proposes a method of intensifying the cooling system of transformer oil on the basis of ideas about Phenomenon of transillation transfer is a heat transfer. Intensification of heat exchange process is that the heat removal from heating oil in the transformer is carried out at the expense of the circulation bubbling sulfur hexafluoride, pumped by the compressor. After surfacing sulfur hexafluoride bubble passes through the filter, holding the oil particles trapped by rising bubbles and then passing cleaning and cooling system, the duty cycle repeats. In the process of theoretical studies Zeldovich's method, complemented by the reduction method to the equivalent integro-differential equation in temperature field calculations, was used to determine the effective coefficient of transillation heat transfer. Studies show that by passing electric gas bubbles through the transformer oil is an increase of the effective thermal conductivity associated with the heat transfer transillatory. The proposed cooling system increases the coefficient of heat transfer in oil and helps to control the cooling system of power oil transformers efficiently.

Keywords: thermal conductivity, heat transfer, transillation heat transfer, sulfur hexafluoride, transformer, bubbling, cooling system

На сегодняшний день в России остро стоят проблемы, связанные с техническим перевооружением промышленности и ликвидацией технологического отставания от промышленно развитых стран. Как показала практика, большую роль в этом могут сыграть физические методы, которые позволяют без заметных энерго- и ресурсных затрат интенсифицировать различные технологические процессы в промышленности [1–11].

Одной из таких задач является повышение эффективности охлаждения силовых

масляных трансформаторов, которые отработали нормативный срок службы, установленный заводами-изготовителями. Существующие системы охлаждения силовых масляных трансформаторов не обеспечивают эффективный отвод тепла от токоведущих элементов при кратковременных перегрузках, чем значительно снижают их надёжность.

В работе предлагается способ повышения эффективности системы охлаждения трансформаторов, основанный на барбо-

тировании трансформаторного масла пузырьками элегаза. Большое значение коэффициента теплового расширения элегаза способствует образованию конвективных потоков, перераспределяющих неоднородности теплового поля в объеме трансформаторного масла [4–6]. В среде с конвективными ячейками возникает сложное поле скоростей, которое приводит к возрастанию эффективного коэффициента теплопроводности. При определенных условиях величина эффективного коэффициента теплопроводности может на несколько порядков превышать молекулярный коэффициент теплопроводности, поэтому исследование механизма переноса тепла в объеме трансформаторного масла с конвективными ячейками имеет важное практическое значение для повышения эффективности системы охлаждения силовых трансформаторов [12, 15].

Теоретическая часть

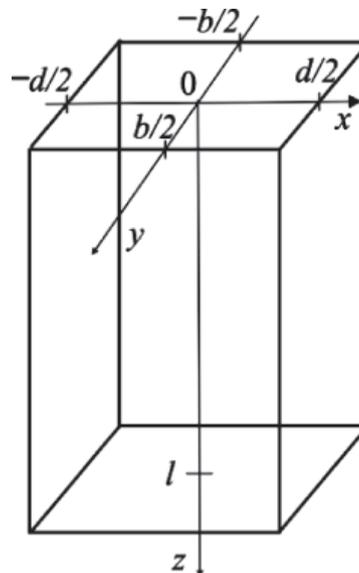
В процессе теоретических исследований для определения эффективного коэффициента трансилляторного переноса тепла использован метод Зельдовича, дополненный методом редукции к эквивалентному интегро-дифференциальному уравнению при определении температурного поля [15]. Конвективный перенос тепла в поле скоростей всплывающих пузырьков может быть представлен в виде потока, эквивалентного молекулярному. Это является следствием замкнутости потока, поскольку средний конвективный массоперенос за характерный период колебаний равен нулю. Из изложенного следует также, что конвективный теплоперенос в любых ячейках типа естественной конвекции эквивалентен молекулярному тепловому движению при условии замкнутости потока.

Путем осреднения конвективного потока, при определении которого использовано интегро-дифференциальное уравнение для температуры, выражающее температурное поле через его градиент, определены выражения для эффективных коэффициентов теплопроводности [12]. Установленное положение об эквивалентности переноса тепла конвективной ячейкой и молекулярными структурами явилось теоретической основой экспериментальных измерений эффективной теплопроводности [4]. Ячеистые структуры в экспериментальной установке генерируются регулярно всплывающими пузырьками. В основе генерации лежит известный факт, что при всплывании отдельного пузырька частицы «выделенной» жидкости движутся по замкнутым траекториям.

Математическая модель предлагаемой системы охлаждения силового трансфор-

матора представляет собой задачу теории теплопроводности о температурном поле в прямоугольном параллелепипеде (рисунок), ограниченном по осям x , y и z соответственно:

$$0 < x < \frac{d}{2}, \quad 0 < y < \frac{b}{2}, \quad 0 < z < l, \quad t > 0.$$



Геометрия задачи

Внутри емкости в начальный момент находится трансформаторное масло при температуре $T_0 = 15^\circ\text{C}$, которое постепенно, со временем, приобретает температуру $T_H = 70^\circ\text{C}$, соответствующую температуре нагревателя. Температурное поле внутри емкости определяется путем решения уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad 0 < x < \frac{d}{2};$$

$$0 < y < \frac{b}{2}; \quad 0 < z < l, \quad t > 0,$$

со следующим начальным условием:

$$T|_{t=0} = T_0$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности.

Теплообмен с окружающей средой на поверхности S подчиняется закону Ньютона:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_S = \alpha (T|_S - T_0),$$

где S – поверхность стенки; α – коэффициент теплоотдачи среды (трансформаторное масло – стенка емкости – воздух).

Обозначим $h = \frac{\alpha}{\lambda}$, тогда граничные условия можно записать как

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\frac{d}{2}} + h \left(T \Big|_{x=\frac{d}{2}} - T_0 \right) = 0;$$

$$T|_{z=l} = T_0; \quad T|_{z=0} = T_n.$$

Поскольку продолжительность эксперимента намного больше времени установления температуры нагревателя, то температура нагревателя считается постоянной, $T_n = \text{const}$. Среднесуточное изменение температуры окружающей среды составляет 10°C , время проведения эксперимента – меньше двух часов, поэтому температура окружающей среды за время проведения эксперимента считается неизменной, $T_0 = \text{const}$. Решив задачу методом свертки, получим уравнение изменения температуры:

$$T = 16 \left[\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(\chi_n d/2) \sin(\mu_m b/2) \cos(\chi_n x) \cos(\mu_m y)}{(\chi_n d + \sin(\chi_n d))(\mu_m b + \sin(\mu_m b))} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \frac{\text{sh}(\sqrt{\chi_n^2 + \mu_m^2} \cdot (l-z))}{\text{sh}(\sqrt{\chi_n^2 + \mu_m^2} \cdot l)} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\pi k \sin\left(\frac{\pi k}{l} z\right) \exp\left(-a(\chi_n^2 + \mu_m^2 + (\pi k/l)^2)t\right)}{(\chi_n^2 + \mu_m^2)l^2 + \pi^2 k^2} \right\} \right] \cdot (T_n - T_0) + T_0,$$

где уравнения для определения коэффициентов χ_n и μ_m записываются как

$$-\chi_n \sin\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) + h \cos\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) = 0;$$

$$h \cos\left(\mu_m \frac{b}{2}\right) - \mu_m \sin\left(\mu_m \frac{b}{2}\right) = 0.$$

Экспериментальная часть

С целью проверки полученных теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования на разработанном лабораторном стенде.

Эксперименты проводились на лабораторном стенде, состоящем из реактора, нагревательного элемента, микрокомпрессора, измерительных устройств и персонального компьютера. В качестве реактора использована цилиндрическая ёмкость радиусом 12,5 см и высотой 30 см, заполненная трансформаторным маслом, на оси которого по центру закреплён нагревательный элемент. Газовые пузырьки создаются с помощью микрокомпрессора, осуществляющего впрыск газа через специальные кера-

мические распределители, расположенные в нижней части реактора. Регулирование интенсивности нагрева трансформаторного масла осуществляется с помощью лабораторного автотрансформатора, подключённого к нагревательному элементу. Для регистрации температурного поля в объеме емкости размещены термопары, сигналы с которых поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя ADAM4018. Далее сигналы направляются в персональный компьютер, который позволяет управлять, регистрировать и обрабатывать информацию с помощью специально разработанной программы [13].

Результаты исследований показали, что при пропускании элегазовых пузырьков через трансформаторное масло коэффициент эффективной теплопроводности возрастает в 27 раз [14]. Фактически это означает, что при всплывании элегазовых пузырьков

механизм трансцилляторного переноса тепла становится доминирующим [15].

Механизм теплообмена данного процесса следующий: основной теплосъём с нагреваемого масла в трансформаторе осуществляется за счёт циркуляции барботируемого элегаза, обладающего большим коэффициентом теплового расширения, в масле образуется конвективный поток, эффективно уносящий тепло. После всплытия пузырьков элегаз проходит через систему фильтров, удерживающих частицы масла, захваченные всплывающими пузырьками, и далее, пройдя систему очистки и охлаждения, возвращается обратно в работу для повторения рабочего цикла.

Выводы

1. В результате теоретических расчетов получено уравнение изменения температуры, которое позволяет вычислить температурное поле внутри реактора с трансформаторным маслом с всплывающими пузырьками элегаза.

2. Результаты экспериментов показали, что барботирование трансформаторного масла пузырьками элегаза позволяет повы-

сильнее коэффициент эффективной теплопроводности в 27 раз.

3. Предложенный способ интенсификации системы охлаждения позволяет:

- повысить эффективность системы охлаждения силовых трансформаторов за счёт барботирования масла элегазом, что значительно повышает коэффициент эффективной теплопроводности;

- внедрить в производство за счёт значительного ресурсо- и энергосбережения, основанного на снижении массогабаритных показателей конструкции и уменьшения изоляционных промежутков, а также улучшенных условий охлаждения токоведущих частей, без использования вентиляторов или других дорогостоящих систем охлаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта главы Республики Башкортостан за 2015 г.

Список литературы

1. Абрамов В.О., Абрамов В.О., Андрианов Ю.В., Кистев Э.В., Градов О.М., Шехтман А.В., Классен Н.В., Муллакаев М.С., Булычев Н.А. Плазменный разряд в кавитирующей жидкости // Инженерная физика. – 2009. – № 8. – С. 34–38.
2. Абрамов В.О., Абрамов В.О., Андрианов Ю.В., Градов О.М., Муллакаев М.С., Булычев Н.А. Соноплазменный разряд в жидкой фазе // Материаловедение. – 2009. – № 2. – С. 57–63.
3. Бахтизин Р.Н., Бакиев А.В., Хазиев Н.Н. Исследование процесса теплообмена при свободной конвекции в неоднородных средах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – Т. 19. – № 4. – С. 44–49.
4. 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.
5. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Минлибаев М.Р. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 2. – С. 347–357.
6. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Хуснутдинова И.Г. Применение барботажа в системе охлаждения силовых трансформаторов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 29–32.
7. Кызыргулов И.Р., Харрасов М.Х., Хусаинов А.Т. Электрон-фононное взаимодействие в пространственно неупорядоченной системе с сильной межэлектронной корреляцией // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 111, – № 2. – С. 126–135.
8. Минлибаев М.Р., Хисматуллин А.С., Филиппов А.И. Установка для исследования коэффициента температуропроводности в жидкости // Новые промышленные технологии. – 2010. – № 2. – С. 62–63.
9. 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. – 391 с.
10. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2014. – 168 с.
11. Филиппов А.И. Фильтрационно-волновой нагрев нефтяного пласта / А.И. Филиппов, П.Н. Михайлов, А.С. Хисматуллин // Инженерная физика. – 2006. – № 5. – С. 13–21.
12. Хисматуллин А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса в жидкости с газовыми пузырьками: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Уфа, 2010. – С. 34–42.
13. 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.

14. 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.

15. Nigmatulin R.I. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles / R.I. Nigmatulin, A.I. Filippov, A.S. Khismatullin // Thermophysics and Aeromechanics. – 2012. – Т. 19. – С. 589.

References

1. Abramov V.O., Abramov V.O., Andrianov Ju.V., Kisterev Je. V., Gradov O.M., Shehtman A.V., Klassen N.V., Mullakaev M.S., Bulychev N.A. Plazmennyy razryad v kavitirujushhej zhidkosti // Inzhenernaja fizika. 2009. no. 8. pp. 34–38.
2. Abramov V.O., Abramov V.O., Andrianov Ju.V., Gradov O.M., Mullakaev M.S., Bulychev N.A. Sonoplazmennyy razryad v zhidkoj faze // Materialovedenie. 2009. no. 2. pp. 57–63.
3. Bahtizin R.N., Bakiev A.V., Haziev N.N. Issledovanie processa teploobmena pri svobodnoj konvekcii v neodnorodnyh sredah // Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan. 2014. T. 19. no. 4. pp. 44–49.
4. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Kamalov A.R. Issledovanie izmenenija teploprovodnosti masla pri barbotazhe v sisteme ohlazhdenija silovyh transformatorov // Sovremennyye problem nauki i obrazovaniya. 2014. no. 6. pp. 338.
5. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Minlibaev M.R. Povysheniej effektivnosti ohlazhdenija silovyh maslyanyh transformatorov // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal Neftgazovoe delo. 2014. no. 2. pp. 347–357.
6. Bashirov M.G., Hismatullin A.S., Husnutdinova I.G. Primenenie barbotazha v sisteme ohlazhdenija silovyh transformatorov // Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodородного syrja. 2014. no. 3. pp. 29–32.
7. Kyzrygulov I.R., Harrasov M.H., Husainov A.T. Jelektron-fononnoe vzaimodejstvie v prostranstvenno neuporядоченnoj sisteme s silnoj mezhelektronnoj korrelyaciej // Fizika metallov i metallovedenie. 2011. T. 111, no. 2. pp. 126–135.
8. Minlibaev M.R., Hismatullin A.S., Filippov A.I. Ustanovka dlja issledovaniya koeficienta temperaturoprovodnosti v zhidkosti // Novyye promyshlennyye tehnologii. 2010. no. 2. pp. 62–63.
9. Mullakaev M.S. Ultrazvukovaja intensivifikacija tehnologicheskikh processov dobychi i pererabotki nefi, ochistki neftezagryaznennyh vod i gruntov. Dis. dokt. tehn. nauk. Moskovskij gosudarstvennyj universitet inzhenernoj ekologii. M.: 2011. 391 p.
10. Mullakaev M.S. Ultrazvukovaja intensivifikacija dobychi i pererabotki nefi. M.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2014. 168 p.
11. Filippov A.I. Filtracionno-volnovoj nagrev nefjanogo plasta / A.I. Filippov, P.N. Mihajlov, A.S. Hismatullin // Inzhenernaja fizika. – 2006. no. 5. pp. 13–21.
12. Hismatullin A.S. Teoreticheskoe i jeksperimentalnoe issledovanie teploperenosa v zhidkosti s gazovymi puzыrkami: dis. na soiskanie uch. st. kand. fiz.-mat. nauk. Ufa, 2010. pp. 34–42.
13. Hismatullin A.S., Bashirov M.G., Ishakov R.R. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii program dlja JeVM no. 2015614072 Programma zapisi vyhodnyh dannyh jeksperimenta transformatorного masla s vsplyvajushhimi jelegazovymi puzыrkami.
14. Hismatullin A.S., Bashirov M.G., Ishakov R.R. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii program dlja JeVM no. 2015614073 Programma analiza vyhodnyh dannyh jeksperimenta po opredelenija koeficienta temperaturoprovodnosti transformatorного masla s vsplyvajushhimi jelegazovymi puzыrkami.
15. Nigmatulin R.I. Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles / R.I. Nigmatulin, A.I. Filippov, A.S. Khismatullin // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. T. 19. pp. 589.

Рецензенты:

Абрамов В.О., д.т.н., зам. генерального директора ООО «Виатех», г. Москва;
Муллакаев М.С., д.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова» РАН, г. Москва.