

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАСЛА ПРИ БАРБОТАЖЕ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Баширов М.Г.<sup>1</sup>, Хисматуллин А.С.<sup>1</sup>, Камалов А.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГАНУ «Институт прикладных исследований Республики Башкортостан»

<sup>2</sup> Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Салават, Россия (453250, Салават, ул. Губкина, 22б), e-mail: hism5az@mail.ru

---

На основе разработанной модели увеличения коэффициентов переноса при всплытии пузырьков газа в жидкости предлагается новый способ охлаждения масляных трансформаторов. В статье предложен метод теоретического исследования теплопроводности жидкости со всплывающими пузырьками, в основу которого положена идея, что конвективный перенос тепла в поле скоростей всплывающих пузырьков может быть представлен в виде потока, эквивалентного молекулярному. Предлагается способ повышения эффективности системы охлаждения масляных силовых трансформаторов, основанный на барботировании масла инертным газом. В качестве инертного газа предлагается использовать элегаз, который характеризуется большим коэффициентом теплового расширения и большой плотностью. Большое значение коэффициента теплового расширения элегаза способствует образованию конвективных потоков, перераспределяющих неоднородности теплового поля в объеме трансформаторного масла.

---

Ключевые слова: трансформатор, элегаз, теплопроводность, транскляторный перенос тепла.

## STUDY THE HEAT OIL CHANGES IN BUBBLING IN THE COOLING SYSTEM POWER TRANSFORMERS

Bashirov M.G.<sup>1</sup>, Hismatullin A.S.<sup>1</sup>, Kamalov A.R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The state independent scientific institution «Institute of applied researches of Republic Bashkortostan»

<sup>2</sup>Ufa State Oil Technical University branch in Salavat, Russia (453250, Salavat, street Gubkina, 22b), e-mail: hism5az@mail.ru

---

On the basis of the developed model to increase transfer coefficients for the ascent of the gas bubbles in the liquid a new method of cooling oil transformers. This paper proposes a method of theoretical study of thermal conductivity of the liquid from the pop-up bubbles, which is based on the idea that the convective heat transfer in the field of velocities rising bubbles can be represented as a stream equivalent to the molecular. Provides a method for increasing the efficiency of the cooling system oil power transformers based on oil bubbling an inert gas. The inert gas serves to use sulfur hexafluoride, which is characterized by a high coefficient of thermal expansion and a high density. Big-knowledge of the coefficient of thermal expansion of sulfur hexafluoride promotes the formation of convective flows, redistributing heterogeneity of thermal field in the volume of transformer oil.

---

Keywords: transformer, sulfur hexafluoride, heat conductivity, transillatory heat transfer.

В работе [1] предлагается способ повышения эффективности системы охлаждения трансформатора, основанный на барботировании масла инертным газом. В качестве инертного газа предлагается использовать элегаз, который характеризуется большим коэффициентом теплового расширения и большой плотностью. Большое значение коэффициента теплового расширения элегаза способствует образованию конвективных потоков, перераспределяющих неоднородности теплового поля в объеме трансформаторного масла.

В среде с конвективными ячейками возникает сложное поле скоростей, которое приводит к возрастанию эффективного коэффициента теплопроводности [2-4].

Предположим, что пузырьки имеют строго сферическую форму и жидкость, условно разделена на слои. Процесс теплообмена между слоями происходит быстрее, чем перенос

вдоль оси  $Ox$  в отдельном слое. При наличии всплывающих пузырьков слои смещаются друг относительно друга. В начальный момент нижний слой начинает раздвигаться [5-6]. При дальнейшем всплывании пузырька слои смещаются друг относительно друга.

Максимальное смещение слоя происходит при нахождении слоя на уровне центра пузырька. В результате происходит перенос тепла, вдоль оси  $Ox$ . Такой процесс переноса тепла называется трансцилляторным.

Вычисление коэффициента трансцилляторного переноса, в основу которого положена редукция уравнения конвективной теплопроводности с переменными коэффициентами к эквивалентному интегро-дифференциальному уравнению с последующим интегрированием потока по времени и пространству, произведено в работе [3].

Соответствующее интегро-дифференциальное уравнение для температуры  $T$ , позволяющее выразить температурное поле через градиент, представится как

$$T = T_0 - \Gamma_z z + \int_0^\infty \int_{-\infty}^t \int \left( -v_z \frac{\partial T}{\partial z} - v_p \frac{\partial T}{\partial p} \right) \cdot \frac{\rho'}{4 a_p \sqrt{a_z \pi (t-t')^3}} \times \\ \times \exp \left[ -\frac{(z-z')^2}{4 a_z (t-t')} \right] \cdot \exp \left( -\frac{\rho^2 + \rho'^2}{4 a_p (t-t')} \right) I_0 \left( \frac{\rho \cdot \rho'}{2 a_p (t-t')} \right) d\rho' dz' dt'.$$

Представим всплывающий газ как правильно чередующиеся цепочки равноудаленных пузырьков с расстоянием  $L$  между ними в цепочках. Полагаем, что пузырьки принимают сферическую форму и одинаковы по размерам, и радиусы всплывающих пузырьков намного меньше расстояний между ними, т.е.  $R \ll L$ . Это условие введено для того, чтобы поле скоростей в цепочке пузырьков можно было определить как сумму скоростей, создаваемых отдельными пузырьками. Скорость каждого пузырька постоянна, равна  $\vec{u}$  и направлена параллельно оси  $Z$ .

В нулевом приближении скорость газовой фазы внутри пузырька будем считать равной средней скорости, т.е.  $\vec{v} = \vec{u}$ . Для нахождения поля скоростей жидкости при движении в ней бесконечной цепочки пузырьков газа воспользуемся принципом суперпозиции. Координаты вектора скорости для всплывающей цепочки пузырьков имеют вид бегущей волны

$$v_p = \frac{3}{2} R^3 u \rho \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{z - ut + mL}{\left( \rho^2 + (z - ut + mL)^2 \right)^{5/2}}, \\ v_z = \frac{1}{2} R^3 u \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{2(z - ut + mL)^2 - x^2 - y^2}{\left( x^2 + y^2 + (z - ut + mL)^2 \right)^{5/2}},$$

где  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

В случае пузырьков малых размеров и небольших объемных содержаний газовой фазы вкладом поля скоростей внутри пузырьков можно пренебречь. Для плоской упругой поперечной волны, распространяющейся вдоль оси  $Oz$ , с плоскостью колебаний, параллельной оси  $Oy$ , имеем:

$$v_y(z, t) = A \omega \sin(\omega t - kz), \quad v_z = 0, \quad k = \frac{\omega}{u}. \quad (1)$$

Тогда выражение для коэффициента трансцилляторного теплопереноса имеет вид

$$\lambda_{\text{тр.}} = \frac{c\rho A^2 u^2}{2a(1 + u^4/(a^2\omega^2))}. \quad (2)$$

При малых числах Маха  $M = A\omega/u$  разложим (2) в степенной ряд и, удерживая два члена, получим  $\lambda_{\text{тр.}} \approx \frac{c\rho a}{2} M^2 \left(1 - \frac{a^2 M^2}{A^2 u^2}\right)$ .

Впрочем, при всплывании пузырьков в жидкости числа Маха, как показывают оценки, могут принимать значения порядка единицы и выше. Рассмотрим далее случай плоской немонахроматической волны, бегущей вдоль оси  $Oz$ . Представив соответствующую координату скорости смещения среды в виде интеграла Фурье, получим

$$v_y(z, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} U_y(\omega) \exp\left\{i\omega\left(t - \frac{z}{u}\right)\right\} d\omega, \quad (3)$$

где  $U_y(\omega)$  – спектральная компонента скорости. Для заданных коэффициентов Фурье смещений  $A_m$  и  $B_m$  в волновом поле имеем

$$\lambda_{\text{тр.}} = \frac{c\rho u^2}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(A_m^2 + B_m^2)}{a^2(1 + u^4/m^2\omega_0^2)}. \quad (4)$$

Полученное выражение свидетельствует об аддитивности коэффициента трансцилляторного переноса  $\lambda_{\text{тр.}}$  относительно гармоник Фурье. Для монохроматических колебаний  $A_1 = A$  и  $A_m = 0$  (при  $m \neq 1$ ),  $B_m = 0$  из (4) получим выражение, совпадающее с (2). Поле скоростей в горизонтальном направлении представляет периодическую структуру типа стоячей волны, поэтому в нулевом приближении составляющую скорости запишем в виде  $v_z = 2u \cos(k\rho) \cos(\omega t)$ , где  $k = 2\pi/L_x$ . Точное решение отыскивается в виде

$$T(\rho, z, t) = T_0 + \Gamma z + B \cos(k\rho) \cos(\omega t + \varphi). \quad (5)$$

Параметры  $B, \varphi$  находим подстановкой  $T(\rho, z, t)$  в уравнение. Получим

$$B = -\frac{2\Gamma u}{\sqrt{a^2 k^4 + \omega^2}}, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{\omega}{a k^2}. \quad (6a)$$

Таким образом, получим решение в следующем виде

$$T(\rho, z, t) = T_0 + \Gamma z - \frac{2\Gamma u}{\sqrt{a^2 k^4 + \omega^2}} \cos(k\rho) \cos(\omega t + \varphi). \quad (7)$$

В невозмущенном решении, плотность потока тепла

$$\vec{j}_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (8)$$

В точном решении, очевидно, средний по времени поток по прежнему направлен по оси  $z$ . Усредняя полный поток и умножая на усредненную величину градиента температуры, получим выражение для определения эффективного коэффициента теплопроводности согласно диссипативной теореме Зельдовича

$$\langle \vec{j}_z \rangle \langle \nabla T \rangle = -\lambda \langle (\nabla T)^2 \rangle = -\lambda_{\text{эфф.}} \langle \nabla T \rangle^2. \quad (9)$$

Поскольку

$$\langle \nabla T \rangle = \Gamma, \quad (9a)$$

$$\langle \nabla T \rangle^2 = A^2, \quad (9б)$$

$$(\nabla T)^2 = A^2 + B^2 k^2 \sin^2(k\rho) \cos^2(\omega t + \varphi), \quad (9в)$$

$$\langle (\nabla T)^2 \rangle = \Gamma^2 + B^2 k^2 / 4. \quad (9г)$$

Усреднение значения  $\vec{j}_z$  производится как по времени, так и по объему, в данном случае по  $z$ . Найдем

$$\lambda_{\text{эфф.}} = \lambda \left( 1 + \frac{k^2 u^2}{a^2 k^4 + \omega^2} \right). \quad (10)$$

Как видно из формулы (10), эффективный коэффициент трансилляторного переноса зависит от волнового числа  $k$ , скорости всплытия пузырьков  $u$ , молекулярного коэффициента переноса  $a$  и частоты  $\omega$ . Сравнение с формулой (2) показывает, что зависимость  $\lambda_{\text{тр.}}$  от  $k, u, a$  и  $\omega$  остается той же самой. Однако величина коэффициента в стоячей волне в два раза боль-

ше, чем в бегущей. Как не трудно убедиться, остальные зависимости для немонахроматических возмущений в стоячей волне получаются теми же, что и для бегущей волны.

Итак, 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. Аналогично легко показать, что конвективный теплоперенос в любых ячейках типа естественной конвекции эквивалентен молекулярному тепловому движению при условии замкнутости потока.

### **Заключение**

Предложенная теория позволяет рассчитывать коэффициенты теплопереноса при «барботаже» жидкости газовыми пузырьками. Это открывает новые направления исследований в нефтехимической промышленности [2-4], тепло- и электроэнергетике.

### **Список литературы**

1. 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.
2. R.I. Nigmatulin, R.P. Taleyarkhan, R.T. Lahey Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation revisited // Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part A: Journal of power and energy. – 2004. – № 5. – С. 345-364 ISSN: 0957-6509.
3. Нигматулин Р.И., Филиппов А. И., Хисматуллин А. С. Трансцилляторной перенос тепла в жидкости с газовыми пузырьками // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19 – № 5. – С. 595-612.
4. Хисматуллин А.С., Филиппов А.И., Минлибаев М.Р. Установка для исследования коэффициента температуропроводности в исследуемой жидкости // Новые промышленные технологии. – 2010. – № 2. – С. 62-63.
5. Хисматуллин А.С., Филиппов А.И., Серебренников Н.П., Минлибаев М.Р. Определение коэффициента трансцилляторного переноса при барботаже в жидкости // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 52-53.
6. Филиппов А.И., Хисматуллин А.С., Мухаметзянов Э.В., Леонтьев А.И. Тепловой трансциллятор бегущей волны // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 1. – С. 78-86.

7. Faizullina L.K., Salikhov S.M., Valeev F.A., Iskakova M.M., Safarov M.G. GLUCOSAMINIDES PROCEEDING FROM LEVOGLYCOSENONE // Russian Journal of Organic Chemistry. – 2011. – Т. 47. – № 11. – С. 1750-1754.
8. Абрамов В.О., Муллакаев М.С., Калинин В.Т., Абрамова А.В., Баязитов В.М., Есипов И.Б., Салтыков А.А., Салтыков Ю.А. Комплекс оборудования и ультразвуковая технология восстановления продуктивности нефтяных скважин//Нефтепромышленное дело. – 2012. – № 9. – С. 25-30.

**Рецензенты:**

Жирнов Б. С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химико-технологических процессов филиала ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Салават;

Вильданов Р. Г., д.т.н., профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Салават.