УДК 621.56

В. И. Милованов, д.т.н., Д. А. Балашов

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРА МАЛОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ПОМОЩЬЮ НАНОФЛЮИДОВ

Нанофлюиды, являющиеся коллоидным раствором частиц металлов и их оксидов в базовой жидкости, способны значительно повысить ее теплопроводность. В статье рассматривается способ повышения теплопроводности изобутана R600a, применяемого в качестве рабочего тела в малой холодильной машине, что может привести к повышению качества ее работы. Повышение эффективности рассмотрено на примере конденсатора холодильной машины.

Ключевые слова: нанофлюид, изобутан, холодильная машина, конденсатор.

Международные нормы по выводу из оборота веществ, разрушающих озоновый слой, побуждают к поиску новых экологически безопасных рабочих веществ. Основным препятствием на пути внедрения озонобезопасных фреонов стало их влияние на глобальное потепление. Киотский протокол ограничивает внедрение хладагентов с высоким коэффициентом глобального потепления. Выходом является повышение энергетической эффективности холодильной машины путем повышения СОР, это позволяет существенно снизить косвенный парниковый эффект холодильной машины. Уменьшить потребление электроэнергии холодильной машиной возможно за счет улучшения эффективности теплообменных систем. Улучшение конвективного теплообмена и теплопроводности жидкостей ранее достигалось смешиванием микроскопических частиц с базовой жидкостью. Однако стремительное осаждения, эрозия, слипание и падение давления, вызванные этими частицами сильно замедлили внедрение этой технологии на практике. Но есть объекты, которых по существу не было в арсенале исследователей еще 20 лет назад и без которых невозможно современное развитие науки - это наночастицы во всем их многообразии. Одной из главных причин изменения физических и химических свойств малых частиц по мере уменьшения их размеров является рост относительной доли «поверхностных» атомов, находящихся в иных условиях (координационное число, симметрия локального окружения и т.п.), нежели атомы внутри объемной фазы. С энергетической точки зрения уменьшение размеров частицы приводит к возрастанию роли поверхностной энергии.

Очень малое количество наночастиц, равномерно распределенных в базовой жидкости может обеспечить впечатляющие улучшения термодинамических характеристик базовой

жидкости. Новые теплоносители с улучшенными термодинамическими характеристиками являются одним из вариантов улучшения теплопередачи. Важным достижением в исследовании теплоносителей является применение коллоидной смеси основной жидкости хладагента или компрессорного масла и металлических частиц размером 1-100 нанометров. Их применение может увеличить теплопередачу больше, чем на 50 % в реальных теплообменных аппаратах холодильных установок даже когда относительный объем наночастиц меньше, чем 0,3 % [1]. Например, теплопроводность меди при комнатной температуре в 700 раз выше, чем у воды и в 3000 раз выше, чем у моторного масла.

Использование нанофлюидов позволяет существенно повысить тепломассообменные характеристики хладагента, уменьшить температурные перепады на поверхностях конденсатора и испарителя, и в результате снизить отношение давлений кипения и конденсации, а, следовательно, и потребляемую холодильной машиной электрическую мощность. Уникальными свойствами нанофлюидов является увеличенная теплопроводность, вязкость и коэффициент теплопередачи. Предполагается, что числа Нуссельта для нанофлюидов выше, чем у базовой жидкости при определенных параметрах потока (например, при равных числах Рейнольдса). Повышенные числа Нуссельта в сочетании с более высокой теплопроводностью дают лучшую конвективную теплопередачу по сравнению с базовым теплоносителем. Дисперсия наночастиц в жидкости приводит к повышенной вязкости, на что влияет средний диаметр частицы, концентрация и температура [2]. Повышенная вязкость уменьшает числа Рейнольдса по сравнению с базовой жидкостью при той же скорости. Эти факторы должны быть взвешены при оценке применимости нанофлюидов в качестве хладагента.

На рис. 1 показан пример нанофлюида, состоящего из медных частиц, растворенных в этиленгликоле. Теплопроводность выросла на 40 % по сравнению с базовой жидкостью при том, что это увеличение было достигнуто при очень малых объемных концентрациях наночастиц, составляющих доли процента.

Результаты опытов показывают одних аномальное поведение теплопроводности, других - укладываются в представления об обычных суспензиях. Такое расхождение данных разных авторов свидетельствует о большом разнообразии факторов, влияющих на теплопроводность наножидкости, и о необходимости дальнейшего накоплении опытных данных и их систематизации.

В литературе излагается большой объем теоретических работ по эффективной теплопроводности двух- и более-компонентных материалов, например подход Гамильтона и Кроссера и другие. Ключевое значение этих работ в том, что перенос тепла описывается уравнением диффузии, которое при температурном поле T принимает форму

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \chi \nabla^2 T \,, \tag{1}$$

где χ - коэффициент температуропроводности, определенный как

$$\chi = \lambda / \rho c_n, \tag{2}$$

где λ - теплопроводность, ρ - плотность,

 C_p - удельная теплоемкость.

Расчет эффективной теплопроводности сложного вещества включает решение уравнения Лапласа (уравнение диффузии в стационарном режиме) с граничными условиями, удовлетворяющими непрерывности теплового потока $J_{\rm O}$

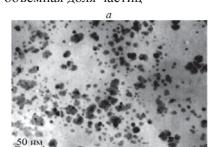
$$\vec{J}_o = -k\vec{\nabla}T. \tag{3}$$

Существует несколько эмпирических поправок вычисления эффективной теплопроводности наножидкостей. В литературе коэффициент повышения теплопроводности определен как отношение теплопроводности наножидкости к теплопроводности базовой жидкости. Исследователи разработали свои теплопроводности модели основе классических теорий Максвелла по изучению теплопроводности через гетерогенную среду. Эффективная теплопроводность двухфазной смеси, состоящей из непрерывной и прерывистой фаз вычисляется как

$$k_{c} = k_{f} \frac{2k_{p} + k_{f} - V_{p}(k_{f} - k_{p})}{2k_{p} + k_{f} - 2V_{p}(k_{f} - k_{p})},$$
 (4)

где k_c — рассчитываемая теплопроводность сложной системы,

 k_f — теплопроводность жидкости k_p — теплопроводность твердых частиц V_p — объемная доля частиц



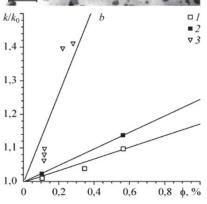


Рисунок 1 — Нанофлюид медь-этиленгликоль. Структура наножидкости (а), зависимость теплопроводности наножидкости от концентрации частиц (b)

Максвелл разработал модель, основываясь на предположении, что прерывистая фаза является сферической и теплопроводность наножидкости зависит от теплопроводности сферических частиц, базовой жидкости и объемной доли частиц.

Гамильтон и Кроссер расширили работу Максвелла для того, чтобы распространить ее и на частицы несферической формы. Они ввели фактор влияния формы п, который определяется экспериментально для разных типов материалов. Целью их исследования была разработка модели как функции формы частиц, состава и теплопроводности обеих фаз

$$k_{c} = k_{f} \times \left[\frac{k_{p} + k_{f}(n-1) - (n-1)V_{p}(k_{f} - k_{p})}{k_{p} + k_{f}(n-1) + V_{p}(k_{f} - k_{p})} \right], \quad (5)$$

где n — фактор влияния формы частиц, выведенный эмпирически (для сферических частиц n=3) и определяется как $n=3/\psi$, ψ – сферичность, определенная как отношение площади поверхности сферы с объемом, равным частицы к площади поверхности объему Гамильтона-Кроссера Модель частицы. сводится к модели Максвелла при у=1 и согласуется с экспериментальными данными для $V_p < 30$ %. Модель верна до тех пор, пока теплопроводность частиц больше теплопроводности жидкости по крайней мере в 100 раз. Несмотря на то, что эксперименты показывают достаточную пригодность этих моделей в прогнозировании теплопроводности, они не учитывают влияние размера наночастиц.

Для однофазного турбулентного потока существует поправка [3], основанная на экспериментальных данных:

$$Nu_{nf}=rac{h_{nf}d}{K_{nf}}=0{,}0059 imes \ imes \left(1{,}0+7{,}6286\ \phi^{0.6886}Pe_{_d}^{0.001}
ight)\!\mathrm{Re}_{nf}^{0.9238}\ \mathrm{Pr}_{nf}^{0.4}$$
 Поправка для ламинарного потока:

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf}d}{K_{nf}} = 0.4328 \times \times (1.0 + 11.285 \, \varphi^{0.754} Pe_d^{0.218}) \text{Re}_{nf}^{0.333} \, \text{Pr}_{nf}^{0.4}$$
(7)

Число Пекле (*Pe*) характеризует отношение плотности теплового потока, перенесенного конвективным путем к плотности теплового потока, перенсенного теплопроводностью. Числа Пекле, Рейнольдса и Прандтля для нанофлюида определяются как

$$Pe_{d} = \frac{u_{m}d_{p}}{\alpha_{nf}}, \qquad (8)$$

$$Re_{nf} = \frac{u_m d}{v_{nf}}, \qquad (9)$$

$$Pr_{nf} = \frac{V_{nf}}{\alpha}. \tag{10}$$

Коэффициент температуропроводности

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} = \frac{K_{nf}}{(1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p}.$$
 (11)

В соответствии с моделью Гамильтона-Кроссера нами были проведены расчеты теплопроводности нанофлюида, состоящего из изобутана и наночастиц TiO₂, CuO, Cu, фуллерена C_{60} . Их параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры наночастиц

| Частицы | Теплопроводность, | Размер, нм |
|------------------|-------------------|------------|
| | Вт/м*К | |
| CuO | 76,5 | 60 |
| Cu | 401 | 80 |
| TiO ₂ | 8 | 27 |
| C ₆₀ | 0,4 | ~40 |

Графики изменения теплопроводности изобутана R600a (изначальная теплопроводность $0.08326~\mathrm{BT/m*K}$) при концентрациях наночастиц 0.1%, 0.5%, 1%, 2.5%, 5% приведены на рис. 2.

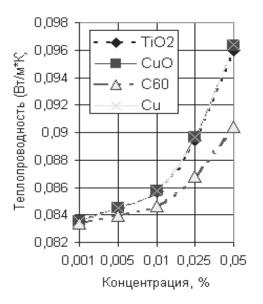


Рисунок 2 – Влияние нанодобавок на теплопроводность R600a

Как видно из рисунка 2, теплопроводность базовой жидкости растет с повышением концентрации, но при низких концентрациях разница между различными видами частиц почти не ощущается.

Для проведения теоретического расчета был взят конденсатор малой холодильной машины, работающей на изобутане. Конденсатор представляет собой медную трубу диаметром 10 мм, размещенную в другой трубе, по которой протекает вода, отбирающая теплоту, выделяющуюся при конденсации. Расчеты проводились при температурах конденсации 40, 45, 50 °C. Во время всех расчетов принималось, что течение охлаждающей воды - ламинарное. В качестве

добавок были взяты наночастицы меди в количестве 2,5 % по объему.

В результате расчетов были получены значения теплопроводности при чистом хладагенте и с добавками наночастиц (рис. 3).

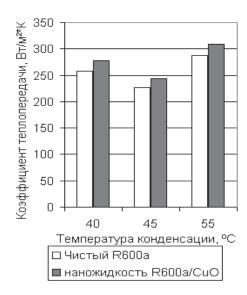


Рисунок 3 — Значения коэффициента теплопроводности при чистом хладагенте и с добавкой 2,5 % наночастиц меди

Повышение коэффициента теплопроводности конденсатора дает возможность передавать большее количество теплоты через ту же площадь поверхности.

Использование наночастиц, растворенных в рабочем теле холодильной машины является перспективным средством для повышения ее

эффективности и уменьшению потребления электроэнергии. Это возможность лает инженерам разработать компактное эффективное холодильное оборудование. Применение нанодобавок перспективно также в домашних холодильниках, торговом промышленном оборудовании. Перспективы применения нанофлюидов в качестве добавок в хладагенты современных холодильных машин очевидны, однако эта проблема требует дальнейшего изучения, анализа, теоретических и экспериментальных исследований.

Список использованных источников

- 1. Roy Strandberg, Debendra K. Das. Finned tube performance evaluation with nanofluids and conventional heat transfer fluids // International Journal of Thermal Sciences. 2010. Vol. 49. P.580-588.
- 2. R. Saidur, K. Y. Leong, H. A. Mohammad. A review on applications and challenges of nanofluids // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol.15. -P. 1646-1668.
- 3. Y. Xuan, Q. Li. Investigation convective heat transfer and flow features of nanofluids // J. Heat Transfer. 2002. Vol.125. P. 151–155.

Поступила в редакцию 15.11.2013

Рецензент: д.т.н., професор, М. Г. Хмельнюк, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса.

В. І. Мілованов, д.т.н., Д. О. Балашов

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ МАЛОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ НАНОФЛЮІДІВ

Нанофлюіди, які є колоїдним розчином частинок металів та їх оксидів в базовій рідини здатні значно підвищити її теплопровідність. У статті розглянуто спосіб підвищення теплопровідності ізобутана R600a, що використовується як робоче тіло в малій холодильній машині, що може призвести до підвищення якості її роботи. Підвищення ефективності розглянуто на прикладі конденсатора холодильної машини.

Ключові слова: нанофлюід, ізобутан, холодильна машина, конденсатор.

V. I. Milowanov, DSc, D. A. Balashov

NANOFLUIDS TO ENHANCE PERFORMANCE QUALITY OF THE SMALL REFRIGERATOR

Nanofluids, being a colloidal solution of metal particles and their oxides in the base fluid can significantly increase its thermal conductivity. This aticle addresses a method of improving the thermal conductivity of isobutane R600a, used as a working fluid in a small refrigerating machine. The enhancement of thermal conductivity can lead to improved performance. The performance of the condencer is given as an example of thermal conductivity enhancement.

Keywords: nanofluid, isobutane, refrigerator, condenser.