

УДК 621.56–022.532

Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C_{60} в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы

С. А. МОРОЗ¹, канд. техн. наук О. Я. ХЛИЕВА², Н. Н. ЛУКЬЯНОВ³,
д-р техн. наук В. П. ЖЕЛЕЗНЫЙ⁴

¹frosthp@yandex.ru, ²khliyev@ukr.net, ³nikolai_lukyjanov@ukr.net, ⁴vzhelezny@mail.ru

Одесская национальная академия пищевых технологий
65082, Украина, г. Одесса, ул. Дворянская, 1/3

Выполнен анализ влияния вязкости компрессорного масла и добавок в него фуллеренов C_{60} на показатели эффективности холодильной системы с компрессором бытового холодильного прибора. Рассмотрена технология приготовления компрессорного масла с примесями фуллеренов C_{60} и показана хорошая агрегативная стабильность полученного образца наномасла. Приводятся результаты исследования значений концентраций примесей масла и фуллеренов в рабочем теле в различных узлах компрессорной системы. Представлены результаты экспериментального исследования холодопроизводительности и мощности потребляемой компрессором холодильной компрессорной системы на рабочих телах R600a/компрессорное масло ($\nu_{40} = 8$ сСт), R600a/компрессорное масло ($\nu_{40} = 19,5$ сСт) и R600a/компрессорное масло ($\nu_{40} = 19,5$ сСт) / фуллерены C_{60} при разных расходах рабочего тела. Показано, что добавка 0,0036 г фуллеренов C_{60} на 1 г рабочего тела заправленного в компрессорную систему не приводит к заметному изменению холодопроизводительности, но способствует снижению потребляемой компрессором мощности и увеличению холодильного коэффициента. Приведенные результаты исследования демонстрируют, что научно обоснованный выбор вязкости компрессорного масла и включение в состав рабочего тела фуллеренов являются важными факторами, которые способствуют повышению эффективности бытовых холодильных приборов.

Ключевые слова: фуллерены C_{60} , рабочее тело, раствор хладагент-масло, холодильная компрессорная система, холодопроизводительность, холодильный коэффициент.

Информация о статье

Поступила в редакцию 16.11.2015, принята к печати 29.01.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-41-46

Ссылка для цитирования

Мороз С. А., Хлиева О. Я., Лукьянов Н. Н., Железный В. П. Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C_{60} в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 41–46.

The influence of the compressor oil viscosity and fullerenes C_{60} additives in the oil on the energy efficiency of refrigeration compressor system

S. A. MOROZ, Ph. D. O. Ya. KHLIYEVA, N. N. LUKIANOV, D. Sc. V. P. ZHELEZNY

Odessa National Academy of Food Technologies
Dvoryanskaya, 112, Odessa, Ukraine, 65036

The analysis of the compressor oil viscosity and fullerenes C_{60} additives in the oil on the energy efficiency of refrigeration system with the household refrigeration compressor has been performed. The method of preparation of compressor oil with fullerenes C_{60} additives has been considered. The good aggregative stability of the fullerenes C_{60} in sample of nano-oil has been obtained. The results of the investigation of the compressor oil and fullerenes concentrations in the working fluid in various units of the compressor system have been presented. The results of the experimental study of the cooling capacity and the compressor power consumption of the refrigeration compressor system with the such working fluids as R600a / compressor oil ($\nu_{40} = 8$ cSt), R600a / compressor oil ($\nu_{40} = 19,5$ cSt) and R600a / compressor oil ($\nu_{40} = 19,5$ cSt) / fullerenes C_{60} at different values of working fluid flow rate have been presented. It was shown that the addition of 0.0036 g of C_{60} per 1 g of the working fluid does not led to change the cooling capacity of the refrigeration compressor system, but led to decreasing the compressor power consumption and increasing the coefficient of performance. The results of the article demonstrate that the science-based choice of compressor oil viscosity and inclusion the fullerenes in the working fluid are important factors for increasing the efficiency of household refrigerator.

Keywords: fullerenes C_{60} , working fluid, refrigerant/oil solution, refrigerant compressor system, cooling capacity, coefficient of performance.

Введение

Одним из перспективных направлений повышения энергетической эффективности парокомпрессионного холодильного оборудования является применение, так называемых, нанохладагентов — рабочих тел, состоящих из растворов хладагента с компрессорным маслом, в которое добавлено определенное количество наночастиц [1–3].

В настоящее время уже имеется достаточно большой объем экспериментальных исследований, посвященных изучению теплофизических свойств нанофлюидов различного состава (в том числе нанохладагентов) [2, 4, 5]. В этих статьях отмечается положительное, с точки зрения требований холодильной техники, изменение свойств нанохладагентов по сравнению с традиционным рабочим телом — раствором хладагента с компрессорным маслом (РХМ): увеличение теплопроводности, давления насыщенных паров, уменьшение поверхностного натяжения РХМ с примесями наночастиц. Однако примеси наночастиц всегда приводят к увеличению вязкости базовой жидкости [2, 4, 5]. Указанные изменения теплофизических свойств РХМ, связанные с наличием примесей наночастиц в компрессорном масле, определяют изменение показателей энергетической эффективности холодильной машины. Поскольку показатели эффективности компрессорной системы зависят от довольно большого количества факторов, выполнить прогнозную оценку изменения холодопроизводительности и потребляемой компрессором мощности при наличии наночастиц в рабочем теле парокомпрессионной холодильной машины, даже при наличии данных о теплофизических свойствах РХМ с примесями наночастиц, невозможно.

Следует отметить, что выбор наночастиц для создания перспективных для применения в холодильной технике многокомпонентных (хладагент/масло/наночастицы) нанофлюидов достаточно ограничен. Это преимущественно оксиды металлов, а так же некоторые углеродные наноматериалы. В настоящее время имеется ряд исследований, посвященных экспериментальному исследованию влияния примесей наночастиц оксидов металлов к рабочим телам на показатели эффективности холодильных машин [6–12]. Приведенные в работах [3, 13] результаты исследований влияния примесей наночастиц TiO_2 и Al_2O_3 в РХМ на показатели эффективности холодильной компрессорной системы указывают на перспективность дальнейших исследований в данном направлении.

Вместе с тем, влияние примесей фуллеренов в рабочем теле на показатели энергетической эффективности холодильного оборудования рассматривается лишь в работе [14]. Xing M. и др. констатируют увеличение холодильного коэффициента бытового холодильника на 5,3–5,6% при использовании компрессорного масла с концентрацией в нем фуллеренов 3 г/л.

Из анализа рассмотренных работ следует, что результаты применения наночастиц в качестве примесей к компрессорному маслу в основном приводят к повышению показателей энергетической эффективности холодильного оборудования. Однако следует заметить, что позитивный эффект в разных исследованиях различен, а иногда лежит в пределах погрешности выполненных экспериментов. При этом комплексная оценка влияния примесей наночастиц в компрессорном масле различной

вязкости на показатели эффективности холодильной машины остается вне рамок проведенных исследований.

Для анализа перспективы применения наноРХМ в холодильном оборудовании, целесообразно продолжить, начатые в работах [3, 13] исследования, что позволит оценить возможность применения фуллеренов в качестве примесей к широко используемому в бытовой холодильной технике рабочему телу — R600a/минеральное масло. При выборе концентрации фуллеренов в рабочем теле необходимо учитывать, что примеси наночастиц увеличивают вязкость компрессорного масла, что приводит к повышению потребляемой компрессором мощности. Этот негативный эффект может быть скомпенсирован, как снижением потерь мощности на трение в подвижных деталях компрессора от присутствия наночастиц, так и применением компрессорных масел с меньшей вязкостью. Снижение потерь энергии на трение в сопрягаемых деталях компрессора при использовании масел с примесями фуллеренов подтверждают результаты исследования, приведенные в работах [15–17].

Методика приготовления рабочего тела и агрегативная стабильность наночастиц в наномасле

Объектами исследования являлись три рабочих тела:
— РХМ1 — раствор хладагента R600a с компрессорным минеральным маслом (вязкость 8 сСт при 40 °С);
— РХМ2 — раствор хладагента R600a с компрессорным минеральным маслом ХФ-12 16 (вязкость 19,5 сСт при 40 °С);
— РХМ2+ наночастицы фуллеренов C_{60} с концентрацией 0,50% от массы компрессорного масла.

Важным вопросом, перед началом любого исследования перспектив применения нанофлюидов в холодильной технике, является оценка их коллоидной стабильности (неизменность дисперсного состава со временем). Фуллерены отличаются от наночастиц оксидов металлов тем, что они могут в растворах диспергироваться до отдельных молекул. В то же время, фуллерены в растворах могут существовать и в виде кластеров, размер которых определяется количеством фуллеренов, смешанных с базовой жидкостью и физической природой этой жидкости [20].

Растворимость фуллеренов в различных веществах исследовалась во многих работах. Результаты одного из первых исследований приведены в статье [21]. Так как молекулы фуллеренов неполярные, то они могут очень хорошо диспергироваться в неполярных веществах, причем тем лучше, чем больше молекулярный вес дисперсионной среды [21]. Поэтому, с точки зрения их агрегативной стабильности, минеральное компрессорное масло будет подходящей средой для введения в него фуллеренов. Причем авторы [16] регистрируют достаточно хорошую стабильность наномасла с фуллеренами без сурфактантов, хотя в работе [14] наномасло готовилось с добавлением сурфактантов Span-40 и Tween-60.

Для изучения коллоидной стабильности были подготовлены два образца наномасла с концентрацией фуллеренов C_{60} (CAS№ 99685-96-8) 0,13% масс. в минеральном компрессорном масле ХФ-12 16 (вязкость 19,5 сСт при 40 °С) с использованием сурфактанта Tween-80 (CAS

№ 9005-65-6) и без него. При приготовлении образца наномасла необходимое количество масла и фуллеренов взвешивалось на электронных весах GR 300 с погрешностью измерения массы 0,5 мг. Для равномерного распределения наночастиц в масле образец подвергался диспергированию в ультразвуковой ванне Codison CD 4800 с частотой 42 кГц в течение 9 час.

Для оценки стабильности полученного наномасла использовалась способность фуллеренов поглощать свет пропорционально его концентрации в растворе. В работе измерялся коэффициент поглощения света с длиной волны 397 нм образцом наномасла, находящимся в плоскопараллельных кюветах с длиной оптического пути 1,1 мм. Измерения проводились на спектрофотометре Shimadzu UV-120-02. Результаты наблюдений в течение 2 мес показали отличную стабильность полученных образцов наномасла как с Tween-80, так и без сурфактанта. При приготовлении образца масла для заправки в компрессорную систему было принято решение сурфактант не использовать.

Для заправки в компрессорную систему готовилось наномасло с концентрацией 0,5% масс. фуллеренов. Полученное наномасло заправлялось в картер компрессора, после вакуумирования система заправлялась необходимым количеством хладагента R600a. После заправки хладагентом компрессорной системы брутто концентрация компонентов в растворе хладагент/масло/наночастицы составляла: концентрация масла $x_{\text{масло}} = 70,53\%$ масс., концентрация хладагента $x_{\text{хлад}} = 29,11\%$ масс., концентрация фуллеренов $x_{\text{нч}} = 0,36\%$ масс.

Внешний вид образцов наномасла с двумя концентрациями фуллеренов показан на рис. 1.

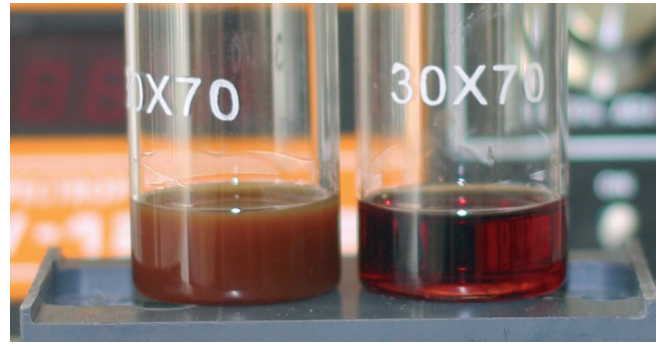


Рис. 1. Образцы компрессорного масла ХФ-1216 с фуллеренами с концентрацией 0,5% масс. (слева) и 0,13% масс. (справа)

(холодильной компрессорной системе с компрессором бытового холодильника Atlant СКН 150), схема которой и методика эксперимента приведены в работах [3, 13].

На данной установке была проведена серия экспериментов, в которых измерялись холодопроизводительность и потребляемая компрессором мощность при различных расходах рабочего тела (в диапазоне $0,202 \cdot 10^{-3} \div 0,404 \cdot 10^{-3}$ кг/с), температурах кипения хладагента (от 254,9 до 255,8 К) и конденсации (от 300,7 до 301,0 К). Для определения холодопроизводительности компрессорной системы использовался метод калориметра с вторичным хладагентом в соответствии с ISO 917-89. Погрешность определения потребляемой компрессором энергии не превышала 0,1%. Степень перегрева рабочего тела относительно температуры насыщения чистого R600a в испарителе поддерживалась на уровне 3 К. С целью определения концентрации масла в циркуляционном контуре системы был проведен ряд экспериментов с отборами проб рабочего тела перед дроссельным устройством.

Результаты экспериментальных значений холодопроизводительности и потребляемой компрессором мощности, при разном расходе рассматриваемых в данном исследовании рабочих тел, приведены на рис. 2, 3.

Результаты исследования энергетической эффективности холодильной компрессорной системы

С целью изучения целесообразности использования рабочих тел с добавками наночастиц в холодильном оборудовании проведена серия экспериментов на установке

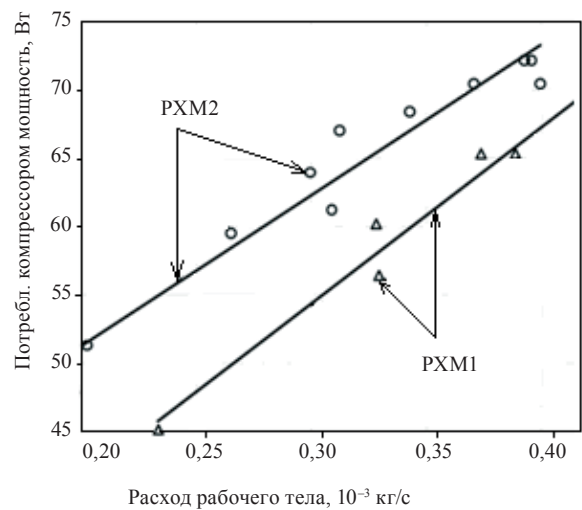
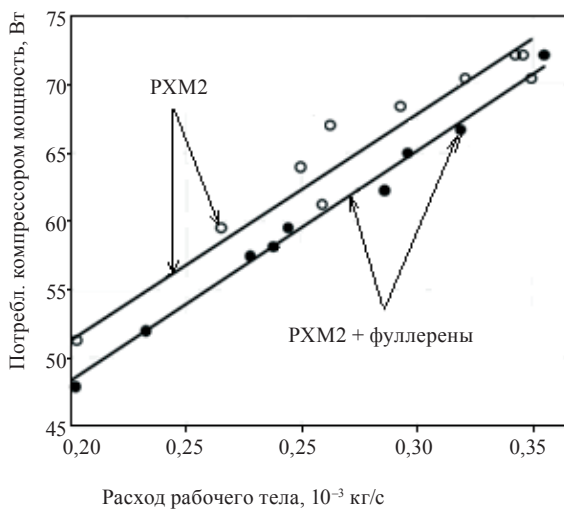


Рис. 2. Зависимость потребляемой компрессором холодильной системы мощности от расхода рабочего тела в контуре холодильной компрессорной системы:
 Δ — PXM1 (R600a/масло с $v_{40}=8$ cCт); \circ — PXM2 (R600a/масло с $v_{40}=19,5$ cCт);
 \bullet — PXM2+фуллерены C_{60} (0,50% масс. в масле)

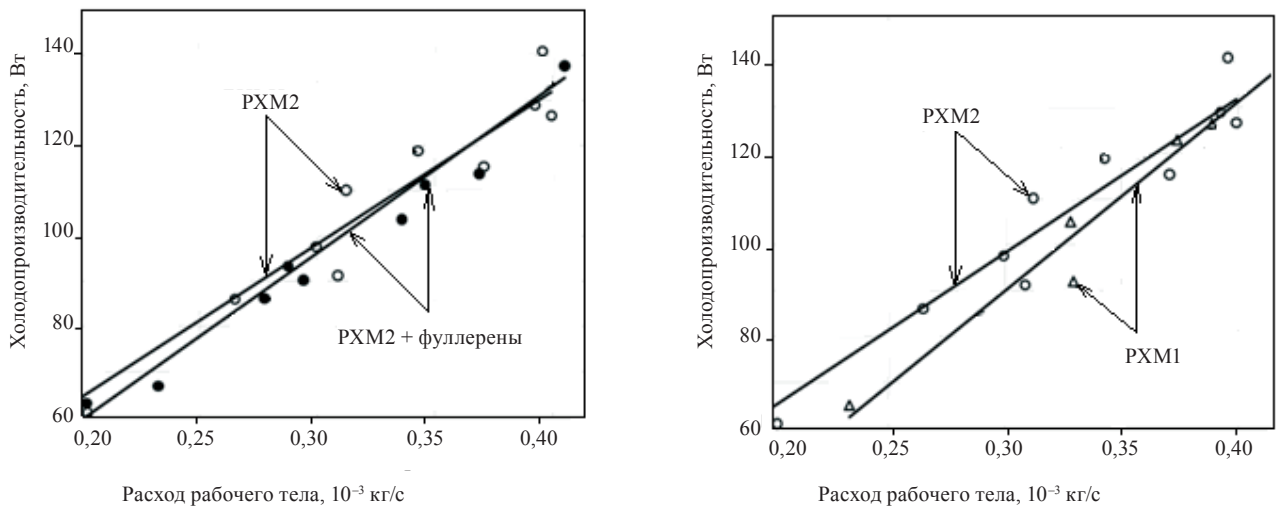


Рис. 3. Зависимость холодопроизводительности холодильной компрессорной системы от расхода рабочего тела в контуре холодильной компрессорной системы: Δ — PXM1 (R600a/масло с $v_{40}=8$ сСт); \circ — PXM2 (R600a/масло с $v_{40}=19,5$ сСт); \bullet — PXM2+фуллерены C_{60} (0,50% масс. в масле)

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, показывает, что наблюдаемое уменьшение потребления энергии компрессором при работе с рабочим телом с примесями фуллеренов составило в среднем 5%. Вместе с тем видно существенное различие в потреблении энергии компрессором в зависимости от вязкости используемого компрессорного масла. При увеличении вязкости компрессорного масла с 8 сСт до 19,5 при 40 °С, затраты энергии увеличились на 9–18%. Для оценки дальнейших перспектив использования фуллеренов в качестве добавок к PXM, интересными являются результаты исследований, приведенные в работе [15]. Авторами Ку В. С., Нан У. С. и др. показано, что для масла с более низкой вязкостью улучшение противозносных характеристик и снижение коэффициента трения между деталями, связанное с присутствием в нем фуллеренов, выше, чем для вязкого масла. Следовательно, при решении задачи повышения энергетической эффективности бытовых холодильных приборов выбор марки компрессорного масла является не менее важной задачей, чем выбор альтернативного хладагента.

Из графиков, представленных на рис. 3, можно сформулировать два вывода. Во-первых, в проведенных исследованиях не зафиксировано существенного изменения холодопроизводительности при добавке фуллеренов к PXM2. Во-вторых, применение более вязких компрессорных масел при малых расходах рабочего тела (следовательно, больших уносах масла из компрессора [18, 19]) способствует увеличению холодопроизводительности компрессорной системы, что видимо связано с увеличением коэффициента подачи. С увеличением расхода рабочего тела эффект от присутствия фуллеренов в рабочем теле уменьшается.

Отсутствие влияния примесей фуллеренов на холодопроизводительность компрессорной системы может быть объяснено низкой концентрацией фуллеренов в рабочем теле и, как следствие, несущественным влиянием на изменение его теплофизических свойств. Фуллерены (как и другие наночастицы) уносятся из компрессора с мелкими каплями компрессорного масла. Выполненные исследования уноса примесей масла из компрессора [18, 19] позволяют рассчитать концентрацию приме-

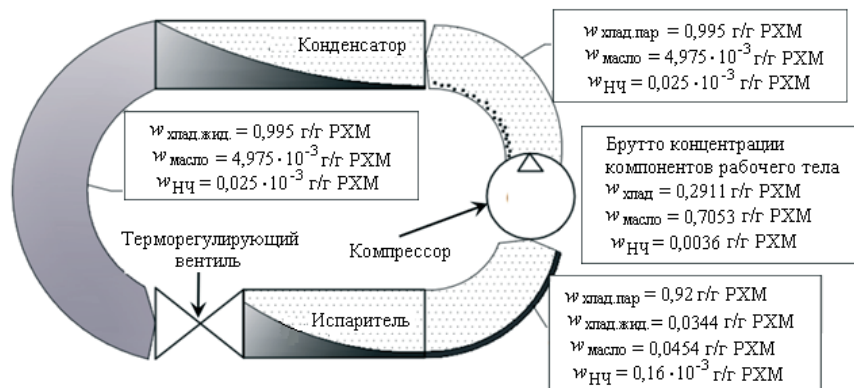


Рис. 4. Концентрация компонентов PXM R600a / компрессорное масло ($v_{40} = 8$ сСт) / наночастицы в различных узлах компрессорной системы при расходе PXM $0,252 \cdot 10^{-3}$ кг/с и его перегреве на выходе из испарителя относительно температуры кипения чистого R600a 3 К

сей фуллеренов в различных узлах компрессорной системы (см. рис. 4).

Из данных рис. 4 следует, что наночастицы циркулируют по контуру компрессорной системы вместе жидкой фазой рабочего тела. Из компрессора наночастицы попадают в конденсатор с каплями масла, так как небольшое количество примесей масла всегда циркулирует по контуру компрессорной системы. Проведенные исследования показывают, что концентрации масла и наночастиц в рабочем теле компрессорной системы на базе компрессора СКН-150 фирмы Atlant незначительны и зависят от массового расхода рабочего тела [18, 19].

Таким образом, выполненное исследование показывает, что примеси фуллеренов в рабочем теле в испарителе имеют низкую концентрацию — $0,16 \cdot 10^{-3}$ г/г РХМ и поэтому практически не оказывают влияния на значение холодопроизводительности компрессорной системы. Напротив, присутствие фуллеренов в компрессоре в концентрации $0,0036$ г/г РХМ позволяет существенно уменьшить потери энергии на трение в сопрягаемых деталях компрессора.

Окончательный вывод о целесообразности применения нанохладагентов в бытовой холодильной технике можно сформулировать, выполнив анализ значений холодильного коэффициента при работе компрессорной системы на различных рабочих телах (см. рис. 5).

Как видно из графиков, показанных на рис. 5, холодильный коэффициент ХКС при добавке в компрессорное масло фуллеренов в количестве всего $0,005$ г/г масла увеличивается примерно на 4% при всех расходах рабочего тела. Применение менее вязкого масла в составе РХМ1 способствует повышению холодильного коэффициента на 5–7%, по сравнению с использованием более вязкого масла в РХМ2. Полученные результаты указывают, что повышение эффективности компрессорной системы связано со снижением потерь энергии на трение в подвижных деталях компрессора. Следовательно, оптимальный выбор компрессорного масла с низким значением вязкости и включение в него примесей фуллеренов должно способствовать существенному повышению энергетической эффективности холодильного оборудования.

Заключение

Представленные в статье результаты показывают, что выбор вязкости компрессорного масла и наличие в нем примесей фуллеренов позволяют изменять в достаточно широких интервалах показатели эффективности компрессорной системы. Так, например, применение в компрессорах для бытовых холодильных приборов минерального масла с вязкостью $\nu_{40} = 8$ сСт приводит к увеличению холодильного коэффициента компрессорной системы на 5–7% по сравнению с использованием компрессорного масла с $\nu_{40} = 19,5$ сСт при равных параметрах холодильного цикла.

Приведены результаты исследования по определению значений концентрации примесей масла и фуллеренов в различных узлах компрессорной системы. В результате проведенных измерений показателей эффективности компрессорной системы показано, что наличие примесей фуллеренов в количестве 0,5% масс. в заправленном в компрессор масле способствует снижению потребляемой мощности в среднем на 4% в интервале расходов рабочего тела от $0,202 \cdot 10^{-3}$ до $0,404 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Уменьшение потребляемой компрессором энергии при добавке в рабочее тело холодильной компрессорной системы фуллеренов C_{60} объясняется разными механизмами [17]. Основным из них, вероятно, является образование на трущихся поверхностях фуллерен-полимерной пленки, которая уменьшает силы трения между деталями компрессора. Напротив, наличие примесей фуллеренов C_{60} в рабочем теле R600a/минеральное масло перед дроссельным устройством в количестве $0,025 \cdot 10^{-3}$ г/г РХМ не приводит к заметному изменению холодопроизводительности компрессорной системы. Приведенные в статье данные показывают, что примеси фуллеренов в количестве 0,5% масс. в компрессорном масле повышают холодильный коэффициент компрессорной системы при средних температурах кипения РХМ 255,5 К и конденсации 301 К в среднем на 4%. Тем самым, полученные в работе данные подтверждают целесообразность применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике.

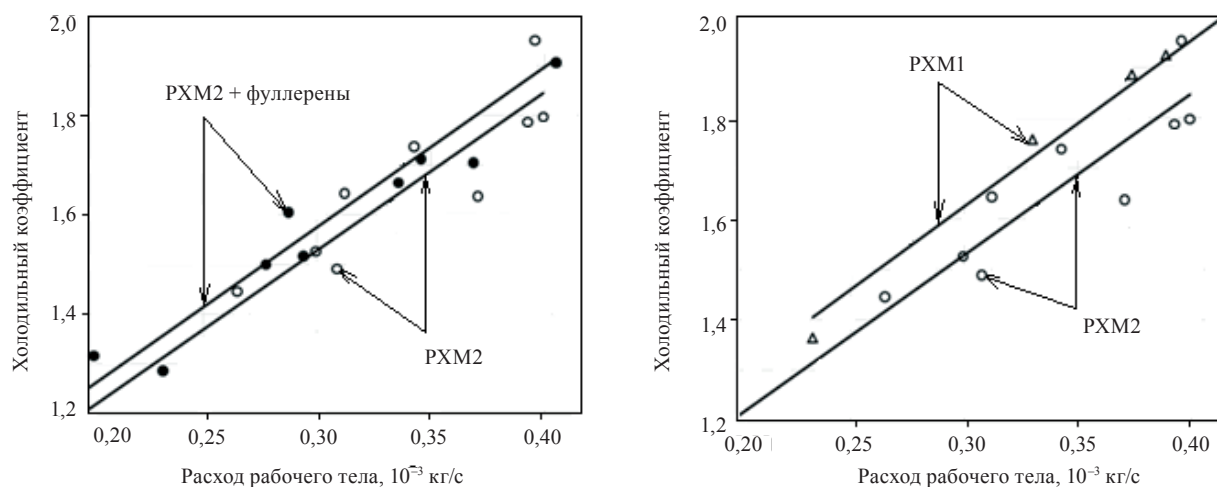


Рис. 5. Зависимость холодильного коэффициента от расхода рабочего тела в контуре холодильной компрессорной системы:
 Δ — РХМ1 (R600a/масло с $\nu_{40} = 8$ сСт); \circ — РХМ2 (R600a/масло с $\nu_{40} = 19,5$ сСт);
 \bullet — РХМ2+фуллерены C_{60} (0,50% масс. в масле)

Список литературы (References)

- Zhelezny V. P. An application of nanotechnologies in refrigeration — perspectives and challenges. Proc. 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, IIR Hangzhou. China, 2014.
- Celen A., Çebi A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A. S., Wongwises S. A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and Applications. *International Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 44. P. 125–140.
- Chen G., Zhelezny V., Shestopalov K., Lukianov N., Polyuganich M. An experimental and theoretical investigation of the compressor oil and nanoparticles admixtures influence on the performance of the compressor systems. Proc. 24th International Congress of Refrigeration. Yokohama, Japan, August 16–22, 2015. ID 318.
- Efstathios, E. (Stathis) Michaelides (2014). *Nanofluidics Thermodynamic and Transport Properties* Springer International Publishing Switzerland, 335 p. doi: 10.1007/978-3-319-05621-0
- Nikitin D., Zhelezny V., Grushko V., Ivchenko D. Surface tension, viscosity, and thermal conductivity of nanolubricants and vapor pressure of refrigerant/nanolubricant mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 5, Is. 5 (59). P. 12–17.
- Bi S., Shi L., Zhang L. Application of nanoparticles in domestic refrigerators. *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28, Issue 14–15. P. 1834–1843. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.11.018.
- Bi S., Guo K., Liu Z., Wu J. Performance of a domestic refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52, Issue 1. P. 733–737. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.052.
- Subramani N., Prakash M. J. Experimental studies on a vapour compression system using nanorefrigerant. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011. Vol. 3, Issue. 9. P. 95–102. doi: 10.4314/ijest.v3i9.8.
- Jwo C. S., Jeng L. Y., Teng T. P., Chang H. Effects of nanolubricant on performance of hydrocarbon refrigerant system. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 2009. Vol. 27, Issue. 3. P. 1473–1477.
- Kumar D. S., Elansezhian R. D. Experimental Study on Al₂O₃-R134a Nanorefrigerant in Refrigeration System. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012. Vol. 2, Issue. 5. P. 3927–3929.
- Sabareesh R. K., Gobinath N., Sajith V., Das S., Sobhan C. B. Application of TiO₂ nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems — An experimental investigation. *International Journal Refrigeration*. 2012. Vol. 35, Issue 7. P. 1989–1996.
- Кулешов Д. К., Красновский И. Н. Экспериментальное исследование характеристик домашнего холодильника, использующего нанофлюид R600A/TiO₂ // Холодильная техника та технология. 2014. № 5 (151). С. 12–16. [Kuleshov, D. K., Krasnovskiy, I. N. (2014). Experimental Study of the Characteristics of Domestic Refrigerator Using Nanofluid R600A/TiO₂. *Refrigeration Engineering and Technologies*, 5 (151), 12–16.]
- Лукьянов Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенов Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32–40. [Lukianov, M., Khliyeva, O., Zhelezny, V., Semenyuk, Y. (2015). Nanorefrigerants application possibilities study to increase the equipment ecological-energy efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/5 (75), 32–40. (in Russian)]
- Xing M., Wang R., Yu J. Application of fullerene C60 nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors. *International Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 40. P. 398–403.
- Ku B. C., Han Y. C., Lee J. E., Lee J. K., Park S. H. Tribological effects of fullerene (C60) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity. *Int. J. Precis. Eng. Man.* 2010. Vol. 11. P. 607–611.
- Lee K., Hwang Y., Cheong S., Kwon L., Kim S., Lee J. Performance evaluation of nanolubricants of fullerene in refrigeration mineral oil. *Current Applied Physics*. 2009. Vol. 9, Issue 2. P. 128–131.
- Lee K., Hwang Y., etc. Understanding the Role of Nanoparticles in Nano-oil Lubrication. *Tribology Letters*. 2009. Vol. 35, Issue 2. P. 127–131.
- Zhelezny, V. P. Experimental and theoretical investigation of heat transfer coefficient for boiling of the isobutene/compressor oil solution flow in the pipe [Text] / V. P. Zhelezny, G. M. Chen, K. O. Shestopalov, A. V. Melnyk. Proc. 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, IIR Hangzhou. China, 2014.
- Melnyk, V. A. The Local Heat Transfer Coefficient Variation at the Boiling of the Isobutane/Compressor Oil Solution Flow in the Pipe [Text] / A. V. Melnyk, A. G. Nikulin, V. P. Zhelezny. Proceedings of CONV-14: Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer. Turkey, 2014.
- Безмельницын В. Н., Елецкий А. В., Окунь М. В. Фуллерены в растворах // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 11. С. 1195–1220. [Bezmelnitsyn V. N., Eletskiy A. V., Okun M. V. (1998). Fullerenes in solutions // *Physics-Uspeski* [Advances in Physical Sciences]. 11 (168), 1195–1220. (in Russian).]
- Ruoff R. S., Tse Doris S., Malhotra Ripudaman, Lorents Donald C. Solubility of fullerene (C60) in a variety of solvents. *J. Phys. Chem.* 1993. 97 (13). P. 3379–3383.