

Виконаний аналіз доцільності застосування нанофлюїдів в парокompресійному холодильному обладнанні. Наведені результати експериментального дослідження параметрів ефективності компресорної системи на робочих тілах R600a/компресорне мастило і R600a/компресорне мастило/наночастинки TiO₂ і Al₂O₃

З використанням отриманих експериментальних даних з холодопродуктивності та витрати енергії компресором виконаний еколого-енергетичний аналіз доцільності застосування нанотехнологій в побутовій холодильній техніці

Ключові слова: наночастинки, нанофлюїди, компресорна система, холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт, еколого-енергетичний аналіз

Выполнен анализ целесообразности применения нанофлюидов в парокompрессионном холодильном оборудовании. Приведены результаты экспериментального исследования параметров эффективности компресорной системы на рабочих телах R600a/компресорное масло и R600a/компресорное масло/наночастицы TiO₂ и Al₂O₃

С использованием полученных экспериментальных данных о холодопроизводительности и затратах энергии компресором выполнен эколого-энергетический анализ целесообразности применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике

Ключевые слова: наночастицы, нанофлюиды, компресорная система, холодопроизводительность, холодильный коэффициент, эколого-энергетический анализ

УДК 621.56-022.532

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42565

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОХЛАДАГЕНТОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Н. Н. Лукьянов

Аспирант*

E-mail: nikolai_lukyanov@ukr.net

О. Я. Хлиева

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: khliyev@ukr.net

В. П. Железный

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: vzhelezny@mail.ru

Ю. В. Семенюк

Доктор технических наук, доцент*

E-mail: suv1902@ukr.net

*Кафедра теплофизики и прикладной экологии

Одесская национальная академия

пищевых технологий

ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039

1. Введение

Технология производства холода для промышленности и бытового сектора экономики связана с потреблением большого количества энергии. По мнению ряда экспертов, на производство искусственного холода ежегодно расходуется порядка 20–30 % генерируемой электроэнергии [1]. В связи с мировыми тенденциями, связанными с ростом цен на энергетические ресурсы и требованиями к повышению эколого-энергетической эффективности оборудования, энергосбережение является приоритетным направлением развития всех отраслей промышленности. Выполненный анализ [2] показывает, что возможными направлениями дальнейшего развития холодильной техники являются как внедрение альтернативных (с точки зрения применяемого для работы холодильной машины источника энергии) технологий, так и повышение энергетической эффективности уже используемых холодильных машин.

В последнем отчете комитета по холодильной технике UNEP (программы ООН по охране окружающей среды) [1] рассматривалась концепция устойчивого развития холодильной промышленности (Sustainable Refrigeration), в соответствии с которой одним из основных факторов устойчивого развития является выбор хладагента для холодильной техники, обеспечивающего минимальный вклад в прямую и косвенную эмиссию парниковых газов в атмосферу. Хотя общие принципы оценки эквивалентной эмиссии парниковых газов при производстве искусственного холода известны [3–7], разработка удобных для практической деятельности эколого-энергетических индикаторов до сих пор остается актуальной задачей.

После принятия Монреальского [8] и Киотского [9] протоколов выполнено огромное количество исследований, посвященных разработке новых хладагентов и оценке эффективности их применения в различном холодильном оборудовании. Но как показала практика, «идеального» хладагента (даже для определенного

типа оборудования) не найдено, и по сей день работы в этом направлении не прекращаются.

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 [2, 10]. Вместе с тем эколого-энергетическая целесообразность использования нанохладагентов является еще не изученной проблемой, которая требует всестороннего рассмотрения.

В настоящее время уже имеется достаточно большой объем экспериментальных работ, посвященных изучению теплофизических свойств нанофлюидов разнообразного состава (в том числе нанохладагентов) [10–12]. Во многих работах отмечается положительное (с точки зрения требований холодильной техники) изменение свойств нанохладагентов по сравнению с традиционным рабочим телом – раствором хладагента с маслом (РХМ): увеличение теплопроводности, давления насыщенных паров, уменьшение поверхностного натяжения РХМ с примесями наночастиц. Указанные изменения свойств РХМ, связанные с добавками наночастиц в компрессорное масло, однозначно влекут за собой изменение таких показателей энергетической эффективности холодильной машины как удельная холодопроизводительность, потребляемая компрессором мощность, холодильный коэффициент (при одинаковых параметрах холодильного цикла). Причем теоретический анализ показывает, что указанные выше изменения свойств должны способствовать увеличению холодильного коэффициента [2].

Однако следует заметить, что примеси наночастиц в маслах способствуют увеличению их вязкости [10–12], а, следовательно, и вязкости рабочих тел парокомпрессионных холодильных установок. Данный эффект приводит к увеличению энергетических затрат на циркуляцию рабочего тела по контуру компрессорной системы и, соответственно, к снижению значения холодильного коэффициента.

Поскольку показатели эффективности компрессорной системы зависят от довольно большого количества факторов, оценка влияния на них изменений теплофизических свойств рабочего тела является сложной задачей.

Следует подчеркнуть, что, кроме изменения теплофизических свойств реального рабочего тела, необходимо учитывать и особенности механизма передачи теплоты при его кипении и конденсации в теплообменных аппаратах холодильной машины. В целом оценка обоснованности применения нанотехнологий в холодильной промышленности является комплексной оптимизационной задачей, при решении которой важными являются экологические аспекты, связанные с эксплуатацией холодильного оборудования. Учет этих аспектов целесообразно проводить в рамках методики эколого-энергетического анализа [6, 7, 13], адаптированной к экологическим проблемам, возникающим при производстве искусственного холода.

2. Анализ литературных данных

В настоящее время работ, посвященных исследованиям влияния примесей наночастиц в рабочем теле на показатели эффективности компрессорных систем и в целом холодильного оборудования, немного [14–25]. Приведенные в них результаты достаточно противоречивы [21, 24].

Авторы работы [14] провели экспериментальное исследование энергетических характеристик бытового холодильника при работе на хладагенте R134a, заменив при этом компрессорное полиолэфирное масло (ПОЭ) на минеральное с добавками наночастиц Al_2O_3 и TiO_2 . Было показано, что при использовании хладагента с минеральным маслом при концентрации в нем наночастиц 0,1 масс. % потребление энергии холодильной машиной уменьшается на 26,1 % по сравнению с использованием ПОЭ. В последующей работе [15] авторы продолжили исследование в данном направлении, используя такие рабочие тела холодильной машины, как R134a/компрессорное масло/наночастицы Al_2O_3 и R600a/компрессорное масло/наночастицы TiO_2 . В последнем случае добавка 0,5 г/л наночастиц TiO_2 в рабочее тело привела к увеличению холодопроизводительности на 9,6 % и уменьшению потребляемой компрессором мощности на 5,94 %.

Аналогичные результаты по увеличению холодильного коэффициента для холодильной машины при замене ПОЭ на минеральное масло с наночастицами TiO_2 при работе на трех хладагентах R134a, R436A, R436B получены в работе [17]. В зависимости от хладагента, концентрации и других факторов, авторы показывают максимальное увеличение холодильного коэффициента почти на 30 %.

В работе [18] проводилось сравнение работы холодильной машины на рабочих телах R134a/ПОЭ, R134a/минеральное масло и R134a/минеральное масло/ Al_2O_3 с концентрацией 0,06 масс. % и показано увеличение холодильного коэффициента на 33 % при замене ПОЭ на наномасло.

В работе [19] в кондиционере, в котором использовался хладагент R410A, была произведена замена полиолэфирного масла на минеральное с добавками наночастиц $NiFe_2O_4$. Авторами выполнено исследование растворимости данного масла в хладагенте R410A и показано увеличение холодильного коэффициента приблизительно на 6 %.

Характерная особенность рассмотренных выше работ заключается в том, что авторы попытались заменить более сложные в использовании полиолэфирные масла на минеральные с добавками наночастиц. Несмотря на то, что эксперименты проводились в идентичных условиях, делать выводы о перспективности применения наночастиц при таком подходе нельзя, так как не понятно, какой фактор оказал большее влияние – применение иного компрессорного масла или добавка в рабочее тело наночастиц.

Авторы работы [20] исследовали параметры холодильной машины на рабочем теле R12/наночастицы Al_2O_3 /минеральное масло (с примесями наночастиц 0,05, 0,1 и 2 % от массы рабочего тела). Сравнение проводилось с холодильной машиной при ее заправке хладагентом R134a с ПОЭ. При работе системы с рабочим телом R12/ Al_2O_3 /минеральное масло было отмечено уменьшение степени сжатия в компрессоре. При кон-

центрации наночастиц 0,1 масс. %, которая в работе отмечается как оптимальная, показано снижение энергопотребления на 2,4 % и увеличение холодильного коэффициента на 4,4 % по сравнению с машиной на рабочем теле R134a/ПОЭ.

В работе [21] рассматривались характеристики холодильной машины при использовании в качестве рабочего тела раствора R134a/наночастицы Al_2O_3 /полиалкиленгликольное (PAG) масло и аналогичного рабочего тела без наночастиц. Показано, что при концентрации наночастиц в рабочем теле 0,2 масс. % энергопотребление снижается на 10,32 %. К сожалению, в этой работе не проведено сравнение холодильного коэффициента при работе на нанохладагенте и чистом хладагенте.

Автор работы [22] проводил сравнение параметров эффективности холодильной машины, работающей на хладагенте R12 с чистым минеральным маслом и тем же маслом с примесями наночастиц TiO_2 . Показано, что при концентрации наночастиц 0,01 об. % в компрессорном масле холодильный коэффициент возрастал на 17 %.

В недавно опубликованной статье [23] авторы рассматривали применение наномасла (минеральное масло с примесями 0,2 масс. % наночастиц TiO_2) в холодильной машине с герметичным компрессором при разных температурах кипения. Показано, что потребляемая компрессором мощность при его заправке наномаслом на 9,33 % меньше, чем при использовании масла без наночастиц. Следует подчеркнуть, что в проведенных экспериментах наблюдалось увеличение усредненного по температуре кипения значения холодильного коэффициента на 16,08 %.

В работе [24] на калориметрическом стенде были проведены исследования работы компрессорной системы с использованием в качестве хладагента изобутана и изобутана с добавками наночастиц TiO_2 с концентрациями 0,01 и 0,05 масс. % при трех значениях температуры кипения. Показано незначительное (не более чем на 1,5 %) снижение потребляемой компрессором мощности, увеличение холодопроизводительности (на 0,5 %) и, следовательно, незначительное увеличение холодильного коэффициента (не более чем на 3–4 %) при использовании в качестве хладагента изобутана с наночастицами. Такие незначительные эффекты вполне могут находиться в пределах погрешности эксперимента. Кроме того, кажется не совсем корректным использованный в работе подход к приготовлению рабочего тела, при котором наночастицы смешивались с хладагентом, претерпевающим в рабочих процессах фазовые превращения, а не с компрессорным маслом.

Аналогичные рабочие тела были использованы при испытании бытового холодильника [25]. Исследования показали снижение суточного времени работы компрессора бытового холодильника на нанохладагентах на 3,2 %, что ведет к экономии потребляемой прибором электроэнергии.

Из приведенного выше обзора следует, что результаты применения наночастиц в качестве примесей к компрессорному маслу в основном приводят к повышению показателей энергетической эффективности холодильного оборудования. Однако позитивный эффект в разных исследованиях различен, а иногда [24] лежит в пределах погрешности эксперимента. На основании рассмотренных немногочисленных исследований делать однозначный вывод о целесообразности применения нанотехнологий в холодильной технике пока преждевременно.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение влияния примесей наночастиц на показатели эколого-энергетической эффективности холодильной компрессорной системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– создать экспериментальный стенд для определения показателей энергетической эффективности компрессорной системы;

– выполнить экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц TiO_2 и Al_2O_3 в рабочее тело (R600a/компрессорное масло) на холодопроизводительность, потребляемую компрессором мощность и холодильный коэффициент компрессорной системы;

– исследовать влияния добавок наночастиц TiO_2 и Al_2O_3 в рабочее тело на показатели эколого-энергетической эффективности холодильной компрессорной системы.

4. Результаты экспериментального исследования показателей эффективности работы холодильной компрессорной системы

С целью дальнейшего изучения целесообразности использования нанотехнологий в холодильном оборудовании в лаборатории кафедры теплофизики и прикладной экологии ОНАХТ (Одесса, Украина) проведена серия экспериментов по оценке показателей энергетической эффективности компрессорной системы на нескольких рабочих телах-нанофлюидах. Одной из задач данной работы являлось определение материала и концентрации наночастиц, добавка которых к компрессорному маслу обеспечит наибольшее увеличение холодильного коэффициента при заданных параметрах холодильного цикла.

В соответствии с поставленной целью в лаборатории ОНАХТ создана установка, схема которой приведена на рис. 1.

На данной установке была проведена серия экспериментов, в которых измерялись холодопроизводительность и потребляемая компрессором мощность при различных расходах рабочего тела (в диапазоне 0,00023–0,00043 кг/с), температурах кипения хладагента (от 255,6 до 261,0 К) и конденсации (от 298,5 до 303,8 К). Для определения холодопроизводительности компрессорной системы использовался метод калориметра со вторичным хладагентом (ISO 917-89). Погрешность определения потребляемой компрессором энергии не превышала 0,1 %.

Степень перегрева рабочего тела контролировалась термопарой медь-константан и поддерживалась на уровне 3 К.

Температуры хладагента в различных точках компрессорной системы и воды, охлаждающей конденсатор, измерялись медь-константановыми термопарами с погрешностью не выше 0,1 К.

Для измерения давления в различных точках компрессорной системы установлены несколько преобразователей давления. Погрешность измерения давления преобразователями давления WIKA не превышала 0,4 %.

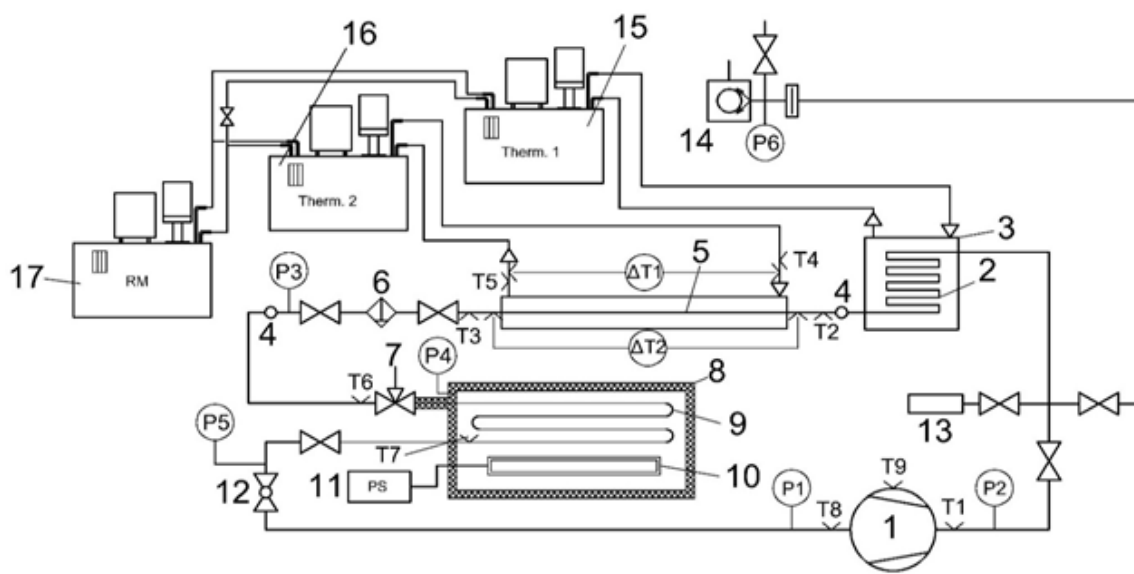


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования показателей энергетической эффективности компрессорной системы: 1 – компрессор Atlant SKH 150; 2 – конденсатор; 3 – теплообменник конденсатора; 4 – смотровое окно; 5 – калориметрический расходомер; 6 – фильтр осушитель; 7 – дроссель-вентиль; 8 – калориметр со вторичным хладагентом R134a; 9 – испаритель калориметра; 10 – нагреватель; 11 – источник питания; 12 – шаровый кран для регулировки давления кипения рабочего тела в испарителе; 13 – заправочный баллон; 14 – вакуумный насос; 15 – термостат для регулирования температуры теплоносителя в системе охлаждения конденсатора; 16 – термостат для регулирования температуры теплоносителя в системе охлаждения калориметрического расходомера; 17 – холодильная машина

В эксперименте проводилось регулирование расхода хладагента через компрессорную систему и при каждом режиме проводилась серия многократных измерений. Измерение расхода осуществлялось калориметрическим расходомером 5 [26, 27].

В настоящей работе значительное внимание было уделено выбору материала наночастиц технологии приготовления нанохладагента. Выполненный анализ литературных данных [10, 11] показал, что для получения различных наножидкостей, используемых в теплоэнергетическом и холодильном оборудовании, наиболее часто применяют наночастицы оксидов оксидов металлов, чистых металлов, а так же углеродные наночастицы (например, фуллерены). Следует заметить, что металлические наночастицы неприменимы в герметичных компрессорах бытовых холодильников ввиду их высокой электропроводности, а фуллерены, кроме того, слишком дороги. В качестве примесей в компрессорном масле использовались наночастицы TiO_2 (CAS №1317-70-0) с размером частиц не более 25 нм и наночастицы Al_2O_3 (CAS №1344-28-1) с размером частиц не более 50 нм.

Параметры компрессорной системы исследовались при работе на следующих рабочих телах:

- хладагент R600a (изобутан)/компрессорное масло (минеральное масло с вязкостью 8 сСт при 40 °C);
- R600a/масло/ наночастицы (НЧ) TiO_2 с концентрацией 0,48 % и 1,0 масс. %;
- R600a/масло/НЧ Al_2O_3 с концентрациями 0,08 % и 0,52 масс. %

В настоящее время нет стандартной технологии приготовления устойчивых наножидкостей. В процессе циркуляции рабочего тела с примесями наночастиц и сурфактантов по контуру компрессорной системы совершаются фазовые переходы, при которых наночасти-

цы преимущественно будут находиться в жидкой фазе (т. е. в растворе компрессорного масла с хладагентом). При этом вопросы стабильности термодинамической системы масло/хладагент/наночастицы/сурфактанты в контуре холодильной машины остаются недостаточно изученными, что сдерживает технологический прогресс в холодильном машиностроении.

Авторами данной работы была использована следующая методика приготовления наножидкостей для компрессорных систем бытовых холодильных приборов [28]. На первом этапе наночастицы с сурфактантом (олеиновая кислота) подвергались перемешиванию в бисерной мельнице в среде гексана на протяжении 10 часов. Эта процедура необходима для разрушения агломератов наночастиц, которые неизбежно образуются при хранении наночастиц в сухом виде. Затем проводилось смешивание приготовленного наножидкости (гексан/наночастицы/сурфактант) с компрессорным маслом. Полученный наножидкость (гексан/наночастицы/сурфактант/компрессорное масло) подвергалась ультразвуковому диспергированию в течение 30 минут. На последнем этапе приготовления наномасла производилась дистилляция с целью удаления гексана из полученного наномасла.

Определенное количество полученного наномасла (минеральное компрессорное масло/сурфактант/наночастицы), соответствующее заданным технологическим условиям концентрации РХМ, заправлялось в картер компрессора. После вакуумирования внутреннего объема компрессорной системы заправлялось необходимое количество изобутана (R600a). Исследование показателей энергетической эффективности компрессорной системы проводилось при различных концентрациях наночастиц в рабочем теле. Увеличе-

ние концентрации наночастиц в рабочем теле осуществлялось за счет дополнительной заправки в компрессорную систему наномасла с высокой концентрацией наночастиц (до 6–10 масс. %).

Концентрация масла в рабочем теле, которое циркулирует по контуру компрессорной системы, в проведенных исследованиях изменялась в интервале от 0,26 до 0,45 масс. %. При таких составах рабочего тела массовая концентрация наночастиц в рабочем теле перед дросселем 7 составляла от 0,00021 до 0,0059 масс. %.

Экспериментальные значения показателей эффективности компрессорной системы определялись при установлении определенных режимов, которые характеризуются достижением выбранного оператором расхода рабочего тела G , давлений кипения P_0 и конденсации P_k , температуры перегрева паров хладагента в испарителе калориметра и мощности нагревателя калориметра. Полученные в результате проведенного эксперимента данные о давлениях кипения P_0 и конденсации P_k хладагента, температурах рабочего тела на выходе из калориметра (при условии перегрева на 3 К относительно температуры кипения чистого 600а при P_0) $T_{исп}$, на входе в компрессор $T_{всас}$ и выходе из компрессора $T_{нагн}$, температуры рабочего тела перед дросселем $T_{дрос.}$, концентрации масла в хладагенте перед дросселем w_m , концентрации наночастиц в рабочем теле перед дросселем $w_{н.ч.}$, холодопроизводительности Q_0 , потребляемой компрессором мощности N и холодильном коэффициенте ϵ в зависимости от расхода рабочего тела приведены в табл. 1.

Для удобства сравнения этих данных на рис. 2 приведены значения холодопроизводительности, потребляемой мощности и холодильного коэффициента при трех значениях массового расхода хладагента в контуре холодильной машины.

Анализируя приведенную в табл. 1 и на рис. 2, а–в информацию, можно сделать вывод о том, что примеси наночастиц в рабочем теле позитивно влияют на эффективность компрессорной системы. Увеличение холодопроизводительности при использовании рабочего тела с примесями наночастиц прежде всего связано с увеличением давления насыщенных паров в камере компрессора. Этот эффект

приводит к увеличению плотности насыщенного пара, а, следовательно, и к увеличению массового расхода рабочего тела.

Увеличение потребления энергии компрессором может быть объяснено двумя факторами. Во-первых, увеличением вязкости РХМ в камере компрессора, что приводит к возрастанию затрат энергии на преодоления сил трения между деталями компрессора. Во-вторых, возрастанием потерь давления (в связи с ростом вязкости РХМ) в испарителе калориметра.

Таблица 1

Экспериментальные значения давлений и температур рабочего тела в некоторых точках компрессорной системы и показателей эффективности в зависимости от расхода рабочего тела

$G \cdot 10^{-3}$, кг/с	P_k , бар	P_0 , бар	$T_{исп.}$, К	$T_{всас.}$, К	$T_{нагн.}$, К	$T_{дрос.}$, К	w_m , масс. %	Q_0 , Вт	N , Вт	ϵ	$w_{н.ч.}$, 10^{-3} масс. %
рабочее тело – РХМ											
0,423	3,89	0,78	255,6	285,2	330,9	290,8	0,27	149,2	71,1	2,03	
0,389	3,87	0,79	261,2	287,7	335,5	291,1	0,27	126,5	65,3	1,92	
0,329	3,72	0,79	257,5	289,3	334,5	291,1	0,30	92,0	56,4	1,72	
0,233	3,54	0,81	257,7	292,3	331,7	291,3	0,63	64,9	45,1	1,41	
0,328	3,76	0,78	256,8	287,7	334,5	290,7	0,30	105,0	60,2	1,72	
0,374	3,75	0,76	258,3	286,6	334,7	290,8	0,27	122,9	65,3	1,87	
0,428	3,75	0,76	257,5	286,0	334,8	291,6	0,26	136,4	69,1	2,04	
рабочее тело – РХМ/TiO ₂ (конц. 0,48 масс. %)											
0,414	3,90	0,79	256,4	283,5	329,1	290,3	0,266	148,7	71,1	2,09	1,3
0,362	3,91	0,79	257,0	285,7	331,8	290,0	0,278	125,8	64,6	1,94	1,3
0,259	3,75	0,78	258,4	288,9	331,1	289,9	0,472	83,1	53,4	1,55	2,3
0,403	4,12	0,78	256,4	284,2	332,6	289,6	0,267	147,0	71,1	2,06	1,3
0,316	4,00	0,80	256,8	286,7	333,3	289,2	0,318	109,0	61,6	1,79	1,5
рабочее тело – РХМ/TiO ₂ (конц. 1,00 масс. %)											
0,367	4,07	0,80	259,3	288,2	333,8	290,5	0,276	131,9	66,4	1,94	2,8
0,320	4,01	0,80	257,5	289,5	333,8	290,5	0,312	107,9	61,2	1,77	3,1
0,331	4,03	0,80	258,5	289,7	334,3	290,6	0,30	109,6	60,9	1,81	2,3
0,238	3,83	0,81	258,1	292,2	334,6	291,0	0,595	75,4	54,4	1,40	5,9
0,438	4,09	0,80	256,9	285,8	333,4	290,4	0,264	153,4	71,5	2,15	2,6
0,388	4,07	0,80	258,1	287,3	334,3	290,3	0,27	136,5	68,1	2,01	2,7
0,360	4,06	0,80	259,3	288,2	335,1	290,3	0,28	120,9	64,3	1,92	2,8
0,276	3,87	0,81	260,2	290,3	334,4	290,2	0,41	90,3	54,7	1,58	4,1
0,274	3,85	0,81	258,0	290,3	334,5	290,2	0,413	83,4	54,4	1,58	4,1
рабочее тело – РХМ/Al ₂ O ₃ (конц. 0,08 масс. %)											
0,428	3,83	0,78	259,1	286,0	334,0	291,0	0,265	152,7	72,2	2,06	0,21
0,411	3,82	0,77	258,4	287,0	335,9	291,0	0,266	139,0	68,4	2,02	0,21
0,354	3,77	0,79	257,9	288,5	337,2	291,0	0,28	118,3	63,3	1,88	0,23
0,268	3,75	0,78	257,8	290,6	337,5	291,0	0,437	88,0	58,1	1,62	0,35
0,413	3,80	0,76	257,6	286,9	335,3	291,2	0,266	133,7	68,1	2,03	0,21
0,228	3,81	0,79	257,9	291,5	336,2	291,4	0,664	79,9	53,0	1,47	0,53
0,277	3,87	0,78	258,4	290,1	338,0	291,5	0,406	95,2	58,1	1,65	0,32
0,268	3,83	0,80	257,9	289,7	337,2	291,0	0,437	99,3	58,5	1,62	0,35
рабочее тело – РХМ/Al ₂ O ₃ (конц. 0,52 масс. %)											
0,284	3,82	0,79	258,6	288,0	334,9	290,4	0,384	108,0	61,2	1,75	2,0
0,308	3,80	0,78	258,6	287,5	336,1	290,5	0,33	115,2	64,3	1,80	1,7
0,348	3,80	0,77	259,2	286,6	336,1	290,7	0,286	133,0	67,7	1,88	1,5
0,331	3,82	0,79	258,6	287,1	335,2	290,5	0,299	115,3	63,6	1,85	1,6
0,384	3,80	0,79	257,0	286,3	336,3	290,6	0,270	129,6	67,7	1,95	1,4
0,387	3,81	0,79	261,3	286,4	336,3	290,7	0,269	132,7	67,7	1,96	1,4
0,420	3,78	0,78	260,0	285,8	335,3	290,9	0,265	141,4	70,1	2,02	1,4
0,421	3,79	0,78	256,9	285,8	335,5	290,9	0,265	139,3	69,8	2,02	1,4
0,291	3,82	0,79	258,3	284,8	333,6	288,7	0,366	111,3	63,3	1,76	1,9
0,303	3,82	0,80	257,8	284,8	333,4	288,7	0,34	109,8	63,3	1,79	1,8
0,374	3,79	0,77	259,5	283,7	333,8	289,2	0,273	133,2	68,7	1,93	1,4
0,417	3,80	0,79	258,4	283,1	333,6	289,6	0,26	149,0	72,5	2,01	1,4
0,269	3,87	0,81	259,2	285,4	333,7	288,8	0,43	109,9	62,6	1,71	2,2
0,360	3,82	0,78	258,4	284,7	334,8	289,6	0,279	130,6	69,1	1,90	1,5
0,319	3,79	0,80	257,9	285,9	334,9	289,7	0,313	116,0	64,6	1,82	1,6

Вместе с тем, повышение холодопроизводительности, связанное с добавками в рабочее тело наночастиц, преувеличивает над возрастанием потребляемой компрессором мощности. Значение холодильного коэффициента при работе системы на нанохладагентах выше, чем на традиционном рабочем теле изобутан/компрессорное мало.

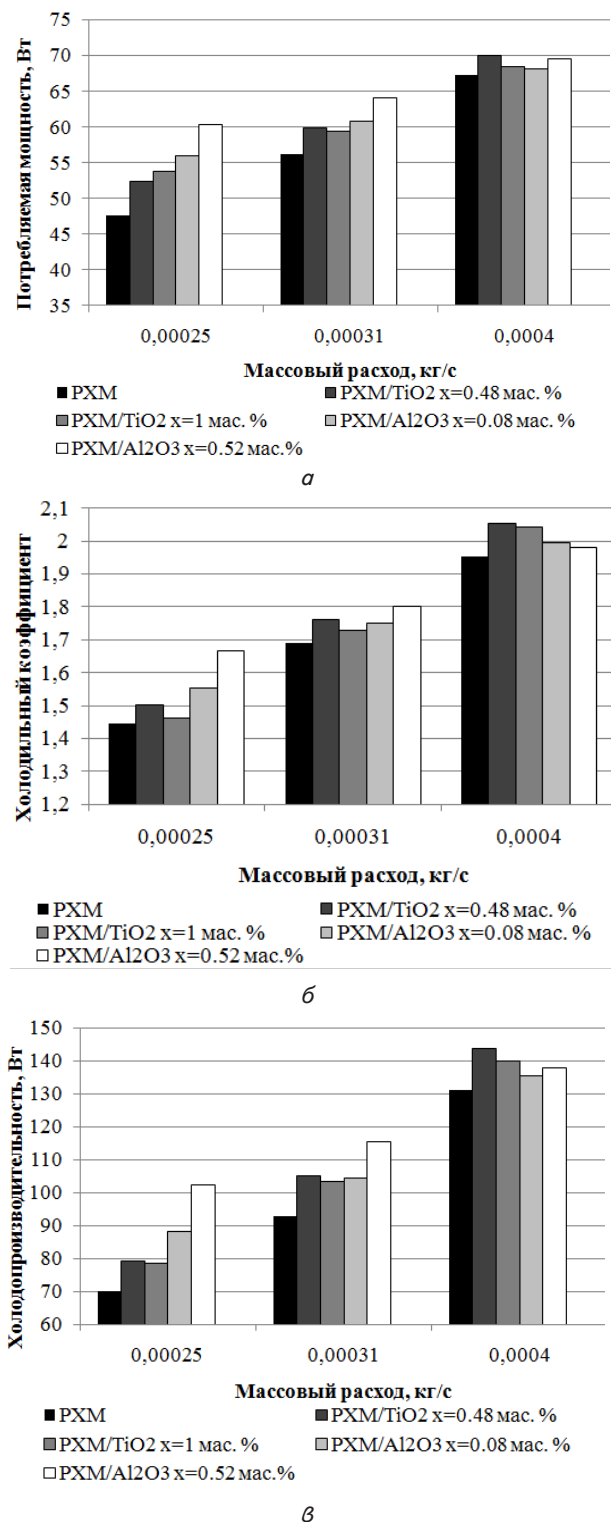


Рис. 2. Зависимость параметров работы компрессорной системы от массового расхода рабочего тела: а – холодопроизводительность, б – потребляемая мощность, в – холодильный коэффициент

4. Эколого-энергетический анализ холодильной компрессорной системы при использовании в качестве рабочих тел наножидкостей

Выбор рабочего тела для холодильного оборудования является очень сложной и многофакторной задачей. Приведенные выше результаты экспериментального исследования холодопроизводительности и холодильного коэффициента компрессорной системы показали повышение ее энергетической эффективности при работе на нанохладагентах. Однако при этом не были учтены энергетические затраты на подготовку рабочего тела (которые однозначно будут выше, чем для традиционных рабочих тел) и на создание экспериментальной установки (компрессорной системы). Поэтому на заключительном этапе научно-обоснованного выбора рабочего тела для пароконденсационного холодильного оборудования должны использоваться методы эколого-энергетического анализа [3–7, 13].

В настоящей работе авторами был использован метод эколого-энергетического анализа, который основан на оценке полной эквивалентной эмиссии парниковых газов (ПЭЭПГ) при эксплуатации оборудования. Эта величина косвенно связана с расходом электроэнергии при производстве оборудования и его эксплуатации на полном жизненном цикле объекта исследования. Метод оценки эколого-энергетической эффективности является альтернативой традиционному технико-экономическому анализу, так как энергетические показатели (энергоёмкость сырья и материалов) не зависят от котировок различных национальных валют и поэтому являются стабильными во времени величинами.

Предлагаемая методика расчета ПЭЭПГ подробно описана в работах [6, 7, 13] и уже успешно использовалась для анализа эколого-энергетической эффективности различных видов оборудования, отличающихся повышенным потреблением энергии, как на стадии производства, так и эксплуатации. При выполнении эколого-энергетического анализа авторами предлагается учитывать все энергетические затраты (и пропорциональные им выбросы парниковых газов (ПГ)) на создание и утилизацию оборудования, прямые выбросы ПГ (в данном случае хладагента), косвенные вклады от энергопотребления при эксплуатации оборудования, а также энергетический эквивалент труда. Так как основные объемы ПГ, связанные с производственной деятельностью, приходится на выбросы CO₂, то величина ПЭЭПГ на полном жизненном цикле любого оборудования имеет размерность кг CO₂. Эмиссия парниковых газов переводится в кг CO₂ с использованием величины GWP (потенциала глобального потепления).

В работах [6, 7, 13] при расчете полной эквивалентной эмиссии парниковых газов предлагается использовать различную исходную информацию: удельные значения эквивалентной эмиссии парниковых газов, энергоёмкость конструкционных материалов либо себестоимость материалов и технологических процессов. Одним из достаточно несложных и обоснованных подходов к оценке удельной эмиссии CO₂ при производстве определенного вида сырья или материала является использование информации об энергоёмкости валового внутреннего продукта (ВВП – $e_{\text{ВВП}}$). По данным U.S. Energy Information Administration [29], значение энергоёмкости ВВП для Украины в 2011 г.

составило 16,56 кВт·ч/U.S.\$\$. Эту величину удобно использовать для оценки эмиссии CO₂ при производстве сырья, материалов, оборудования, располагая информацией о денежных затратах и величине эмиссии CO₂ при производстве 1 кВт·ч электроэнергии в данной стране (регионе) – β. По данным, приведенным в [30], эквивалентная эмиссия парниковых газов при производстве 1 кВт·ч электроэнергии для Украины β=0,697 кгCO₂/кВт·ч. В данной работе при проведении эколого-энергетического анализа время работы установки принималось равным 8 годам.

Применительно к анализу холодильного оборудования величина полной эквивалентной эмиссии парниковых газов может быть рассчитана по формуле:

$$\begin{aligned} \text{ПЭЭПГ} = & \beta(e_{\text{ВВП}} \cdot c_i^{06} + e^{\text{ч.тр}} \cdot n_i^{\text{ч.тр}}) + \\ & + e_{\text{ВВП}} \cdot \beta \cdot c_i^{06} (k_a + k_p) \tau + \\ & + \beta \cdot N \cdot \tau + m_{\text{хл}} \cdot \text{GWP}_{\text{хл}} \cdot \tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где β – выбросы CO₂ при производстве 1 кВт·ч электроэнергии (для Украины), кг CO₂/кВт·ч; e_{ВВП} – энергоёмкость ВВП (для Украины), кВт·ч/ден.ед.; c_i⁰⁶ – себестоимость производства оборудования, ден.ед.; e^{ч.тр} – энергетический эквивалент человеческого труда при создании оборудования, кВт·ч/чел·час; n_i^{ч.тр} – трудозатраты на производство оборудования, чел·ч; k_a+k_p – доля годовых затрат (от капитальных) на амортизацию и ремонт оборудования, год⁻¹; τ – срок эксплуатации оборудования, год; N – мощность, потребляемая системой, кВт; m_{хл} – масса утечек хладагента при эксплуатации оборудования, кг/год; GWP_{хл} – потенциал глобального потепления хладагента, кг CO₂/кг.

Для оценки эколого-энергетической эффективности холодильных машин, которые обладают разной холодопроизводительностью Q, авторами предлагается использовать удельный эко-индикатор μ – выбросы ПГ на единицу произведенного холода на определенном уровне температур в испарителе:

$$\mu = \text{ПЭЭПГ}/Q, \text{ кг CO}_2/\text{кДж холода}. \quad (2)$$

В данной работе экспериментально измеренные значения холодопроизводительности и потребляемой компрессором мощности были использованы для расчета величины ПЭЭПГ на полном жизненном цикле экспериментального стенда и удельного эко-индикатора μ при работе на различных рабочих телах и разных расходах хладагента (рис. 3, а–б).

Из приведенной на рис. 3 информации следует, что примеси наночастиц в рабочем теле способствуют увеличению ПЭЭПГ практически при всех расходах рабочего тела. Наибольшее увеличение ПЭЭПГ (до 5% при расходе 0,27 кг/с) наблюдается при низких расходах рабочего тела в компрессорной системе. С увеличением расхода рабочего тела этот негативный эффект присутствия наночастиц в рабочем теле уменьшается.

При адаптации полученных результатов исследования показателей эффективности компрессорной системы к оценке эколого-энергетической эффективности бытовой холодильной техники дополнительно нужно учитывать позитивное влияние примесей наночастиц на холодопроизводительность компрес-

сорной системы, которая, как показано в табл. 1, увеличивается. Этот позитивный эффект, несомненно, будет способствовать уменьшению времени работы компрессора в бытовом холодильном приборе, как это уже отмечалось авторами работы [15]. Следовательно косвенная эмиссия парниковых газов от затрат энергии на работу компрессора будет уменьшаться.

Кроме того, следует подчеркнуть, что новый эко-индикатор μ является более чувствительным по сравнению с экстенсивной величиной ПЭЭПГ. Если значение ПЭЭПГ изменяется в диапазоне измеряемых расходов рабочего тела не более чем на 7–9%, то предложенный эко-индикатор μ изменяет свою величину на 35–55%. Результаты, приведенные на рис. 2 б, показывают, что при всех расходах рабочего тела, содержащего наночастицы, эколого-энергетическая эффективность компрессорной системы будет выше, чем при работе на традиционном рабочем теле изобутан/компрессорное масло.

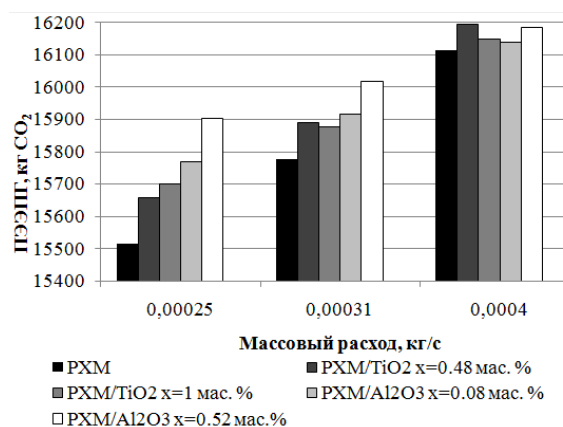


Рис. 3. Полная эквивалентная эмиссия парниковых газов при работе компрессорной системы на различных расходах рабочего тела

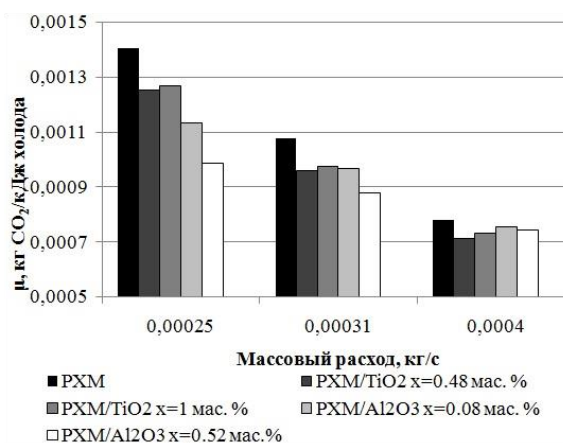


Рис. 4. Удельная эмиссия парниковых газов μ при работе компрессорной системы на различных расходах рабочего тела

5. Выводы

В работе рассмотрено влияние примесей наночастиц TiO₂ и Al₂O₃ в рабочем теле R600a/ минеральное масло на показатели эколого-энергетической эффек-

тивности холодильной компрессорной системы. Приведено описание экспериментального стенда и методики проведения эксперимента.

В результате проведенного экспериментального исследования получены значения холодопроизводительности, мощности компрессора и холодильного коэффициента в зависимости от расхода рабочего тела при работе компрессорной холодильной системы на следующих рабочих телах: R600a/компрессорное масло, R600a/компрессорное масло/наночастицы TiO₂ (1,0 и 0,48 % масс.) и R600a/компрессорное масло/наночастицы Al₂O₃ (0,52 и 0,08 % масс.).

Для научного обоснования целесообразности внедрения нанотехнологий в холодильном оборудовании предложено использовать эколого-энергетический метод анализа, который основан на оценке эмиссии парниковых газов на полном жизненном цикле оборудования – ПЭЭПГ. В статье приведены результаты эколого-энергетического анализа применительно к работе компрессорной системы на рассмотренных рабочих телах.

Из проведенного анализа результатов экспериментального и расчетного исследования эколого-энергетической эффективности компрессорной системы следует однозначный вывод о целесообразности использования нанотехнологий при производстве искусственного холода.

Показано, что внедрение нанотехнологий может значительно снизить удельные затраты энергии на производство холода в исследованных диапазонах параметров работы компрессорной системы. Экономия энергетических ресурсов может достигать 23 % при расходе рабочего тела 0,00025 кг/с и температуре его кипения в испарителе 258 К.

Выбор материала и концентрации наночастиц в рабочем теле компрессионных холодильных машин имеет принципиальное значение. Из проведенного исследования следует, что примеси наночастиц Al₂O₃ с массовой концентрацией 0,52 % оказывают максимальный позитивный эколого-энергетический эффект.

Литература

1. UNEP 2014. Report of the Refrigeration, air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee [Electronic resource] / Assessment, 2014. – Available at: http://www.montreal-protocol.org/Assessment_Panels/TEAP/Reports/RTOC/RTOC-Assessment-Report-2014.pdf
2. Zhelezny, V. P. An application of nanotechnologies in refrigeration – perspectives and challenges [Text] / V. P. Zhelezny // Proc. 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, IIR Hangzhou. – China, 2014.
3. Fisher, S. K. Global warming implications of replacing CFC [Text] / S. K. Fisher, P. P. Fairchild, P. S. Hughes // ASHRAE Journal. – 1992. – Vol. 34, Issue 4. – P. 14–19.
4. McCulloch, A. Life Cycle Analysis to Minimise Global Warming Impact [Text] / A. McCulloch // Renewable energy. – 1994. – Vol. 5, Issue 5-8. – P. 1262–1269. doi: 10.1016/0960-1481(94)90160-0
5. ISO 14040:2006 [Text] / Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
6. Zhelezny, V. Assessment of Total Equivalent of Greenhouse Gases Emission in the Industry [Text] / V. Zhelezny, O. Hlieva, S. Artemenko // CD Proceedings of the 3rd Europeans Congress “Economics and Management of Energy in Industry”. – Lisboa, Portugal, 2004.
7. Железный, В. П. Методика расчета полной эквивалентной эмиссии парниковых газов в промышленности [Текст] / В. П. Железный, Н. П. Быковец, О. Я. Хлиева, В. П. Степанова, А. Б. Суходольская // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 6. – С. 34–43.
8. UNEP [Text] / Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. Final Act: 16 September 1987. – 6 p.
9. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change [Text] / United Nations, 1998.
10. Celen, A. A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and Applications [Text] / A. Celen, A. Çebi, M. Aktas, O. Mahian, A. S. Dalkilic, S. Wongwises // International Journal of Refrigeration. – 2014. – Vol. 44. – P. 125–140. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.05.009
11. Efstathios, E. (Stathis) Michaelides Nanofluidics Thermodynamic and Transport Properties [Text] / E. (Stathis) Michaelides Efstathios. – Springer International Publishing Switzerland, 2014. – 335 p. doi:10.1007/978-3-319-05621-0
12. Nikitin, D. Surface tension, viscosity, and thermal conductivity of nanolubricants and vapor pressure of refrigerant/nanolubricant mixtures [Text] / D. Nikitin, V. Zhelezny, V. Grushko, D. Ivchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2012. – Vol. 5, Issue 5 (59). – P. 12–17. – Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4566/4230>
13. Железный, В. П. Рабочие тела пароконпрессорных холодильных машин: свойства, анализ, применение [Текст]: монография / В. П. Железный, Ю. В. Семенюк. – Одеса: Феникс, 2012. – 420 с.
14. Bi, S. Application of nanoparticles in domestic refrigerators [Text] / S. Bi, L. Shi, Li. Zhang // Applied Thermal Engineering. – 2008. – Vol. 28, Issue 14-15. – P. 1834–1843. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.11.018
15. Bi, S. Performance of a domestic refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid [Text] / S. Bi, K. Guo, Z. Liu, J. Wu // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52, Issue 1. – P. 733–737. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.052
16. Bi, S. Experimental investigation of a refrigerator with a nano-refrigerant [Text] / S. Bi, L. Shi // Journal of Tsinghua University. – 2007. – Vol. 47. – P. 1999–2002.
17. Padmanabhan, V. M. V. The use of TiO₂ nanoparticles to reduce refrigerator ir-reversibility [Text] / V. M. V. Padmanabhan, S. Palanisamy // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 59. – P. 122–132. doi: 10.1016/j.enconman.2012.03.002
18. Subramani, N. Experimental studies on a vapour compression system using nanorefrigerant [Text] / N. Subramani, M. J. Prakash // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – Vol. 3, Issue 9. – P. 95–102. doi: 10.4314/ijest.v3i9.8

19. Wang, R. Use of nanoparticles to make mineral oil lubricants feasible for use in a residential air conditioner employing hydrofluorocarbons refrigerants [Text] / R. Wang, Q. Wu, Y. Wu // *Energy and Buildings*. – 2010. – Vol. 42, Issue 11. – P. 2111–2117. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.06.023
20. Jwo, C. S. Effects of nanolubricant on performance of hydrocarbon refrigerant system [Text] / C. S. Jwo, L. Y. Jeng, T. P. Teng, H. Chang // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. – 2009. – Vol. 27, Issue 3. – P. 1473–1477. doi: 10.1116/1.3089373
21. Kumar, D. S. Experimental Study on Al₂O₃-R134a Nanorefrigerant in Refrigeration System [Text] / D. S. Kumar, R. D. Elansezhian // *International Journal of Modern Engineering Research*. – 2012. – Vol. 2, Issue 5. – P. 3927–3929.
22. Sabareesh, R. K. Application of TiO₂ nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems – An experimental investigation [Text] / R. K. Sabareesh, N. Gobinath, V. Sajith, S. Das, C. B. Sobhan // *International Journal Refrigeration*. – 2012. – Vol. 35, Issue 7. – P. 1989–1996. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.07.002
23. Sajumon, K. T. Performance analysis of nanofluid based lubricant [Text] / K. T. Sajumon, V. Jose Jubin, S. Sreejith, V. Menon Aghil, P. N. Sreeraj Kurup, S. Sarath // *Proceedings of International Conference on Energy and Environment – 2013 (ICEE 2013)*, 2013. – P. 832–838.
24. Кулешов, Д. К. Влияние наночастиц TiO₂ на энергетическую эффективность холодильных машин, работающих на изобутане [Текст] / Д. К. Кулешов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – Т. 5, № 8 (71). – С. 47–52. doi: 10.15587/1729-4061.2014.28038
25. Кулешов, Д. К. Экспериментальное исследование характеристик домашнего холодильника, использующего нанофлюид R600A/TiO₂ [Текст] / Д. К. Кулешов, И. Н. Красновский // *Холодильная техника та технологія*. – 2014. – № 5 (151). – С. 12–16. doi: 10.15673/0453-8307.5/2014.28690
26. 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.
27. 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.
28. Cho, C. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants [Text] / C. Cho, H. S. Yoo, J. M. Oh // *Current Applied Physics*. – 2008. – Vol. 8, Issue 6. – P. 710–712. doi: 10.1016/j.cap.2007.04.060
29. Independent Statistics and Analysis [Electronic resource] / Energy Information Administration. – Available at: <http://www.eia.gov/>
30. World Statistics [Electronic resource] / Available at: <http://world-statistics.org/>