

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(85).13878

Д. А. ВОЛЬЧЕНКО¹, М. В. КИНДРАЧУК², Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ¹, В. М. ЧУФУС¹,
А. Л. ГЛОВИН³

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

²Национальный авиационный университет, Украина

³ОП НУБиП Украины «Бережанский агротехнический институт»

НАНОЖИДКОСТИ В СИСТЕМАХ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПАР ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

В материалах статьи приведены наножидкости, которые применяются в жидкостных системах охлаждения тормозных шкивов и дисков и изучения в них процессов теплопередачи. Также проиллюстрированы теплообменные процессы в системах с наножидкостями. Возникновение в дисперсных системах пространственных структур, образуемых макромолекулами, вызывает резкое повышение вязкости. Динамическая вязкость жидкости обусловлена, в первую очередь, молекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при возникновении в нем трещины, достаточной для внедрения в нее молекулы. Жидкость приходит в движение под действием объемных и поверхностных сил. Первые возникают в результате градиента плотности жидкости. Вторые обусловлены локальным изменением поверхностного натяжения жидкости, что связано, в основном, с возникновением неравномерного распределения объемной температуры или концентрации наночастиц на поверхности, что является, как правило, следствием изменения их термодинамического состояния в объеме жидкости, что влияет на увеличение интенсивности теплообмена. При этом необходимо иметь в виду, что максимальный эффект по увеличению интенсивности теплообмена достигается за счет роста угловой скорости металлических элементов трения, снабженных камерами различных объемов, заполненных нанотеплоносителями. При вращении составного тормозного шкива поверхностные силы преобладают над объемными силами, возникающими в нанотеплоносителях. Такое условие свойственно тонким горизонтальным слоям и пленкам жидкости, вблизи поверхности капель и пузырьков воздуха в жидкости. В свою очередь, отсутствие систематизированных теоретических и экспериментальных данных относительно коэффициентов теплоотдачи и термического сопротивления наножидкостей и их противоречивость при чрезвычайной практической востребованности способствует интенсификации усилий для получения таких данных. Сложность состоит в том, что определение коэффициентов теплопередачи является комплексной задачей, поскольку при этом необходимы значения динамической вязкости наножидкостей и их теплопроводности.

Наряду с фундаментальными проблемами описание процессов, явлений и эффектов, сопровождающих охлаждение наножидкостями, возможно широкое их применение в машиностроении.

Ключевые слова: наножидкость, система охлаждения, пара трения, тормозные устройства, микровыступы контактов, энергетические уровни.

Введение. Известно, что при классическом нестационарном теплообмене исследователи пользуются первой и второй теоремой Г. М. Кондратьева. Первая теорема гласит, что для однородных тел при конечном значении коэффициента теплоотдачи α выполняется соотношение

$$m = \frac{\alpha \cdot F}{\rho \cdot c \cdot V} \cdot \psi, \quad (1)$$

где c, ρ – удельная теплоемкость и плотность материала тела; F, V – площадь поверхности и объем тела; $\psi = \bar{q}_F / \bar{q}_V$ – коэффициент неравномерности темпе-

ратурного поля, равный соотношению средней поверхности избыточной температуры $\bar{\vartheta}_F$ к среднему по объему $\bar{\vartheta}_V$.

Коэффициент ψ остается постоянным в течении всего периода регулярного режима, причем $0 \leq \psi \leq 1$.

Вторая теорема Г. В. Кондратьева устанавливает пропорциональность между темпом охлаждения m и коэффициентом теплопроводности a материала однородного тела при высокой интенсивности теплоотдачи (коэффициента теплоотдачи $\alpha \rightarrow \infty$)

$$m = a / K, \quad (2)$$

где K – коэффициент формы, зависящий только от формы и размеров тела.

Однако, указанные теоремы не учитывают коэффициент теплопроводности материала однородного тела и термическое сопротивление теплопроводности в случае если тело омывается теплоносителем, т. е. наножидкостью.

Постановка задачи заключается в применении в жидкостных системах охлаждения тормозных шкивов и дисков наножидкостей и изучения в них процессов теплопередачи.

Нанотеплоносители, их характеристики и размеры частиц. Рассмотрим виды наножидкостей и их теплофизические параметры. Динамическая вязкость жидкости обусловлена, в первую очередь, молекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при возникновении в нем трещины, достаточной для внедрения в нее молекулы. На образование трещин (на "рыхление" жидкости) расходуется так называемая энергия активации вязкого трения. Эта энергия уменьшается с ростом температуры и понижением давления. В этом состоит одна из причин резкого снижения вязкости жидкости с повышением температуры и роста ее при высоких давлениях.

Возникновение в дисперсных системах пространственных структур, образуемых макромолекулами, вызывает резкое повышение вязкости.

При течении структурированной жидкости работа внешней силы затрачивается не только на преодоление истинной (ньютоновской) вязкости, но и на разрушение структуры.

Вязкость жидкости зависит от химической структуры молекул и возрастает с увеличением молекулярной массы.

Исследования показали, что наножидкости, начиная с определенных концентраций наночастиц в них, становятся неньютоновскими, [1-7]. Рассмотренные наножидкости на основе воды с наночастицами оксида меди (CuO) при их объемных концентрациях свыше 0,25% оказываются вязкопластическими, причем их реология описывается степенными функциями для жидкости. Степень отклонения реологии наножидкостей от ньютоновских растет с увеличением данных. Сложность состоит в том, что определение коэффициентов теплопередачи является комплексной задачей, поскольку при этом необходимы значения динамической вязкости наножидкостей и коэффициентов их теплопроводности.

Перенос теплоты от поверхностей контакта пары трения «беговая дорожка обода шкива — фрикционные накладки» вглубь их тел осуществляется упругими тепловыми колебаниями микрочастиц (ионами или атомами молекул) и тепловым движением электронов проводимости. Отдельное колебание частиц в фи-

зике твердого тела называется фононом. Скорость распространения фононов равна скорости звука. Однако в начальные моменты времени фрикционного нагревания генерированная при трении теплота концентрируется в тонких поверхностных слоях трущихся поверхностей, и можно говорить об ее распространении вглубь тел с конечной скоростью.

При этом необходимо иметь в виду, что максимальный эффект по увеличению интенсивности теплообмена достигается за счет роста угловой скорости металлических элементов трения, снабженных камерами различных объемов, заполненных нанотеплоносителями.

Жидкость приходит в движение под действием объемных и поверхностных сил. Первые возникают в результате градиента плотности жидкости. Вторые обусловлены локальным изменением поверхностного натяжения жидкости, что связано, в основном, с возникновением неравномерного распределения объемной температуры или концентрации наночастиц на поверхности, что является, как правило, следствием изменения их термодинамического состояния в объеме жидкости (эффект Марангони).

Концентрационно-капиллярная конвекция содержит в себе несколько новых гидродинамических эффектов, обусловленных концентрационной неоднородностью нанотеплоносителей вблизи поверхностей камеры шкива при его вращении. Это способствует возникновению вблизи микронеровностей их поверхностей пузырьков и капель. Структура движения наночастиц в полости составного тормозного шкива зависит от его формы, конфигурации и механической чистоты поверхности полости, а также от расположения в пространстве нагреваемой нерабочей поверхности обода шкива в режимах торможения и свободного вращения.

При вращении составного тормозного шкива поверхностные силы преобладают над объемными силами, возникающими в нанотеплоносителях. Такое условие свойственно тонким горизонтальным слоям и пленкам жидкости, вблизи поверхности капель и пузырьков воздуха в жидкости. Необходимо учитывать два основных фактора. Первым фактором является то, что характерное время диффузии теплоты в сотни и даже тысячи раз меньше времени существования концентрационных неоднородностей. В итоге, концентрационные неоднородности в жидкостях существуют значительно дольше тепловых, а их продолжительность и интенсивность действия капиллярных сил на границе раздела фаз многократно возрастает. Это способствует интенсификации отвода теплоты от нанотеплоносителей к стенкам камеры шкива. Вторым фактором является адсорбция наночастиц на поверхности жидкости, способствующая концентрационно-капиллярному дрейфу пузырьков воздуха. Действие сил Марангони на свободной поверхности жидкости вызывает ее движение в направлении возрастания поверхностного натяжения. Поверхность увлекает за собой прилегающие к ней слои жидкости. В результате этого, если свободная поверхность принадлежит пузырьку, то он начинает вытесняться в направлении, противоположном течению жидкости. Такая способность пузырьков воздуха самопроизвольно перемещаться в жидкости в направлении уменьшения величины поверхностного натяжения вызывает их капиллярный дрейф.

Если пузырьки находятся на горизонтальном слое жидкости, ограниченной сверху и по бокам стенками камеры, то такие условия подавляют их всплытие.

Действие концентрационно-капиллярного эффекта наблюдается только в течение ограниченного времени, определяемого скоростью адсорбционного процесса.

Отметим, что в тепловом варианте задачи о движении жидкости вблизи неподвижных пузырьков и капель развивается только ее стационарное течение (соотношение коэффициентов кинематической вязкости и температуропроводности, как правило, не превышает одного порядка).

Установлено, что как только восходящее капиллярное движение пузырька по поверхности прекращается, динамическое равновесие концентрационной «шапки» (как более тяжелой, чем окружающей ее жидкости) нарушается. Восстановление перепада концентрации нанотеплоносителей между полюсами пузырька вновь приводит в действие капиллярные силы, способствующие резкому ускорению восходящего течения. В результате этого у боковой поверхности цилиндрического пузырька возникает интенсивное конвективное движение жидкости за счет появления двух симметричных вихрей. Развиваясь, вихревые ячейки захватывают все больший объем жидкости с высокой концентрацией наночастиц. Благодаря этому средняя плотность нанотеплоносителя в ячейках повышается, и они смещаются вниз, отсекая от нижнего полюса ячеек струю жидкости, подпитывающую ее движение.

Остановимся на наножидкостях и их теплофизических параметрах для систем охлаждения самовентилируемых дисково-колодочных тормозов транспортных средств. Динамическая вязкость жидкости обусловлена, в первую очередь, молекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при ее разрывании в нем трещины, достаточной для внедрения в нее молекулы. На образование трещин (на "рыхление" жидкости) расходуется так называемая энергия активации вязкого трения. Эта энергия уменьшается с ростом температуры и понижением давления. В этом состоит одна из причин резкого снижения вязкости жидкости с повышением температуры и роста ее при высоких давлениях.

Возникновение в дисперсных системах пространственных структур, образуемых макромолекулами, вызывает резкое повышение вязкости.

При течении структурированной жидкости работа внешней силы затрачивается не только на преодоление истинной (ньютоновской) вязкости, но и на разрушение структуры.

Вязкость жидкости зависит от химической структуры молекул и возрастает с увеличением молекулярной массы.

Наножидкость представляет собой коллоидный раствор мельчайших металлических частиц с высоким коэффициентом теплопроводности. В качестве раствора выступает жидкость (вода, 25% раствор аммиака (для районов с холодным климатом)) или жидкий аргон. Наночастицами являются, например, алюминий (Al), медь (Cu), цинк (Zn), оксид алюминия (Al_2O_3), окись меди (CuO) с их размерами до 10 нм. Многочисленные исследования [4, 5, 6 и др.] показали, что зависимость количества наночастиц от диапазона изменения их размера имеет вид плотности нормального распределения.

Коэффициент теплопроводности наножидкости является функцией времени. На коэффициент теплопроводности наножидкостей влияют следующие составляющие: кинетическая, потенциальная, столкновительная, потенциально-кинетическая, столкновительно-кинетическая, потенциально-столкновительная.

При этом взаимодействие несущей среды с наночастицей определяется потенциально-кинетическим потенциалом.

Согласно молекулярно-динамической теории фазовых траекторий наночастиц в жидкости и в насыщенном влажном паре, находящихся в системе охлаждения дисково-колодочного тормоза, имеет место их локальная неустойчивость и перемешивание. При этом необходимо иметь ввиду, что находящиеся в воде наночастицы покрываются пленкой, что способствует возрастанию коэффициента теплопередачи.

Теплообменные процессы в системах с наножидкостями. Отсутствие систематизированных теоретических и экспериментальных данных относительно коэффициентов теплоотдачи и термического сопротивления наножидкостей и их противоречивость при чрезвычайной практической востребованности способствует интенсификации усилий для получения таких данных. Сложность состоит в том, что определение коэффициентов теплопередачи является комплексной задачей, поскольку при этом необходимы значения динамической вязкости наножидкостей и их теплопроводности.

Кроме того, при теплопередаче в системах с наножидкостью основное влияние оказывает объемная концентрация частиц и коэффициент их теплопроводности.

Коэффициент теплопередачи через многослойную структуру системы косвенного охлаждения наножидкостью пар трения дисково-колодочного тормоза грузового транспортного средства марки MAN модели TGA 26.430 в режимах движения и торможения определяют по следующим зависимостям:

– омывание встречными потоками воздуха (наружной поверхности полудиска – кондуктивный теплообмен через толщину полудиска – омывание циркулирующей наножидкостью в системе внутренней поверхности полудиска)

$$K = \frac{1}{\alpha_1^{-1} + \delta\lambda^{-1} + \alpha_2^{-1}}, \quad (3)$$

где α_1^{-1} , α_2^{-1} – термическое сопротивление теплоотдачи; $\delta\lambda^{-1}$ – термическое сопротивление кондуктивного теплообмена; δ – толщина полудиска; λ – коэффициент теплопроводности материала полудиска;

– для омывающей наножидкости, состоящей из воды и металлических частиц, внутренние поверхности полудиска

$$K_1 = \frac{1}{\delta_1\alpha_1^{-1} + \delta_2\lambda_2^{-1}}, \quad (4)$$

где $\delta_1\alpha_1^{-1}$, $\delta_2\lambda_2^{-1}$ – термическое сопротивление слоев воды и наночастиц; δ_1 , δ_2 – толщины слоев: воды; металлических частиц; λ_1 , λ_2 – коэффициент теплопроводности: воды; металлических частиц;

– омывание циркулирующими потоками наножидкости внутренней поверхности полудиска - кондуктивный теплообмен через толщину полудиска – омывание встречными потоками воздуха наружной поверхности полудиска с пустотелыми шипами

$$K_2 = \frac{1}{\alpha_3^{-1} + \delta\lambda^{-1} + \alpha_4^{-1}}, \quad (5)$$

где α_3^{-1} , α_4^{-1} – термическое сопротивление теплоотдачи.

В случае превращения жидкости (воды) в пар в зависимости (3 - 5) необходимо подставлять его физические параметры.

Коэффициент теплоотдачи наножидкости можно увеличить за счет варьирования размерами частиц, т. е. их площадью взаимодействия с жидкостью или путем ее превращения в пар. При этом увеличение размера частиц способствует уменьшению коэффициента теплопередачи.

Кроме того, при теплопередаче в системах с наножидкостью основное влияние оказывает объемная концентрация наночастиц и коэффициент их теплопроводности.

Выводы. Таким образом, приведены наножидкости, которые применяются в жидкостных системах охлаждения тормозных шкивов и дисков и изучения в них процессов теплопередачи.

Список литературы

1. Трибология / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. Ю. Журавлев [и др.]. – Киев – Краснодар: Изд-во «Плай», 2015. – 371 с.
2. Лурье С. Прогноз механических и динамических свойств материалов с микро- и наноструктурой на основе градиентов теории сред / С. Лурье // Электронный журнал Труды ИПРИМ РАН. – М., 2009. – 46 с.
3. Диплом №482 на научное открытие «Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах» от 27.02.2015 г. Авторы А. Х. Джанахметов, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев. Международ. акад. авторов научн. откр. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие №А-618 от 18.12.2014 г.
4. Рудяк В. Я., Краснолуцкий С. Л. Моделирование коэффициентов теплопроводности наножидкости с малыми частицами методом молекулярной динамики / В. Я. Рудяк, С. Л. Краснолуцкий // Журнал технической физики, том 87, вып. 10, 2017 – С. 1450 – 1458.
5. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц окиси меди / А. В. Минаков, В. Я. Рудяк, Д. В. Гузей, А. С. Лобасов // ТВТ, том 53, вып 2, 2015. С. 258 – 263.
6. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизмы теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. Ч.2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика, 2010. №2 С.173.
7. Рудяк В. Я., Белкин А. А. Моделирование коэффициентов переноса наножидкостей // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. Т. 1. №1. С. 156.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2019.

Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, М. В. КИДРАЧУК, Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ, В. М. ЧУФУС, А. Л. ГЛОВИН

НАНОРІДИНИ У СИСТЕМАХ ПРИМУСОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПАР ТЕРТЯ ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ

У матеріалах статті наведені нанорідини, які застосовуються в рідинних системах охолодження гальмівних шківів і дисків та вивчення в них процесів теплопередачі. Також проілюстровані теплообмінні процеси в системах з нанорідинами. Виникнення в дисперсних системах просторових структур, утворених макромолекулами, викликає різке підвищення в'язкості. Динамічна в'язкість рідини обумовлена, в першу чергу, молекулярною взаємодією, що обмежує рухливість молекул. У рідині молекула може проникнути в сусідній шар лише при виникненні в ньому тріщини, достатньої для впровадження в неї молекули. Рідина починає рухатися під дією об'ємних і поверхневих сил. Перші виникають в результаті градієнта щільності рідини. Другі обумовлені локальною зміною

поверхневого натягу рідини, що пов'язано, в основному, з виникненням нерівномірного розподілу об'ємної температури або концентрації наночастинок на поверхні, що є, як правило, наслідком зміни їх термодинамічної стану в об'ємі рідини, що впливає на збільшення інтенсивності теплообміну. При цьому необхідно мати на увазі, що максимальний ефект щодо збільшення інтенсивності теплообміну досягається за рахунок зростання кутової швидкості металевих елементів тертя, забезпечених камерами різних обсягів, заповнених нанотеплоносіями. При обертанні складеного шківів поверхневі сили переважають над об'ємними силами, що виникають в нанотеплоносіях. Така умова властива тонким горизонтальним шарам і плівкам рідини, поблизу поверхні крапель і бульбашок повітря в рідині. У свою чергу, відсутність систематизованих теоретичних і експериментальних даних щодо коефіцієнтів тепловіддачі і термічного опору нанорідин і їх суперечливість при надзвичайній практичній затребуваності сприяє інтенсифікації зусиль для отримання таких даних. Складність полягає в тому, що визначення коефіцієнтів теплопередачі є комплексним завданням, оскільки при цьому необхідні значення динамічної в'язкості нанорідин і їх теплопровідності. Поряд з фундаментальними проблемами опис процесів, явищ і ефектів, які супроводжують охолодження нанорідин, можливе широке їх застосування в машинобудуванні.

Ключові слова: нанорідини, система охолодження, пара тертя, гальмівні пристрої, мікроставупів контактів, енергетичні рівні.

Вольченко Дмитрій Александрович – докт. техн. наук, професор кафедри добычи нефти и газа Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-373-82-42, E-mail: divo99@ukr.net

Киндрачук Мирослав Васильевич – докт. техн. наук, професор, заведующий кафедрой машиноведения, Киевский национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058, E-mail: nau12@ukr.net

Журавлев Дмитрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технической механики Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, моб. 050-950-04-18 E-mail: dmytro.2103@ukr.net

Чуфус Василий Михайлович - аспирант кафедры технической механики, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: mechmach@nung.edu.ua.

Гловин Андрей Леонидович - старший преподаватель кафедры общинженерной подготовки ОП НУБиП Украины «Бережанский агротехнический институт», ул. Академическая, 20, г. Бережаны, Тернопольская обл., Украина, 47501.

D. A. VOLCHENKO, M. V. KINDRACHUK, D. Yu. ZHURAVLOV, V. M. CHUFUS, A. GLOVIN

NANO-LIQUIDS IN SYSTEMS OF APPRO-COOLING OF FRICTION COUPLES OF BRAKE DEVICES

The materials of the article show nanofluids that are used in liquid cooling systems for brake pulleys and disks and for studying heat transfer processes in them. Heat transfer processes in systems with nanofluids are also illustrated. The appearance in spatial systems of spatial structures formed by macromolecules causes a sharp increase in viscosity. The dynamic viscosity of a liquid is due, first of all, to the molecular interaction that limits the mobility of the molecules. In a liquid, a molecule can penetrate into the neighboring layer only when a crack appears in it, sufficient for the molecule to penetrate into it. The fluid moves under the influence of volumetric and surface forces. The first arise as a result of a gradient of fluid density. The second is due to a local change in the surface tension of the liquid, which is mainly associated with the appearance of an uneven distribution of volume temperature or concentration of nanoparticles on the surface, which is usually a consequence of a change in their thermodynamic state in the liquid volume, which affects the increase in heat transfer intensity. It should be borne in mind that the maximum effect of increasing the heat transfer intensity is achieved due to an increase in the angular velocity of the metal friction elements equipped with chambers of various volumes filled with nanocarriers. During the rotation of the composite brake pulley, surface forces prevail over the volume forces arising in nanoelectric carriers. This condition is characteristic of thin horizontal layers and films of liquid, near the surface of droplets and air bubbles in the liquid. In turn, the lack of systematic theoretical and experimental data on the heat transfer coefficients and thermal resistance of nanofluids and their inconsistency in the case of emergency practical demand contribute to the intensification of efforts to obtain such data. The difficulty lies in the fact that the determination of heat transfer coefficients is a complex task, since it requires the values of the dynamic viscosity of nanofluids and their thermal conductivity. Along with fundamental problems, a description of the processes, phenomena, and effects accompanying cooling by nanofluids, their widespread use in mechanical engineering is possible.

Key words: nanofluid, cooling system, friction pair, braking devices, microprotrusion of contacts, energy levels.

References

1. Tribologiya / A. I. Vol'chenko, M. V. Kindrachuk, D. YU. Zhuravlev [i dr.]. – Kiyev – Krasnodar: Izd-vo «Play», 2015. – 371 s.
2. Lur'ye S. Prognoz mekhanicheskikh i dinamicheskikh svoystv materialov s mikro- i nanostrukturoy na osnove gradiyentov teorii sred / S. Lur'ye // Elektronnyy zhurnal Trudy IPRIM RAN. – M., 2009. – 46 s.
3. Diplom №482 na nauchnoye otkrytiye «Yavleniye massoperenosa produktov treniya v metallopolimernykh parakh» ot 27.02.2015 g. Avtorov A. KH. Dzhanakhmetov, A. I. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko, D. YU. Zhuravlev. Mezhdunarod. akad. avtorov nauchn. otkr. i izobret. – Ekspertiza zayavki na otkrytiye №A-618 ot 18.12.2014 g.
4. Rudyak V YA., Krasnoluts'kiy S. L. Modelirovaniye koeffitsiyentov teploprovodnosti nanozhidkosti s malymi chastitsami metodom molekulyarnoy dinamiki / V. YA. Rudyak, S. L. Krasnoluts'kiy // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, tom 87, vyp. 10, 2017 – S. 1450 – 1458.
5. Izmereniye koeffitsiyenta teplootdachi nanozhidkosti na osnove vody i chastits okisi medi / A V. Minakov, V. YA. Rudyak, D. V. Guzey, A. S. Lobasov // TVT, tom 53, vyp 2, 2015. S. 258 – 263.
6. Terekhov V. I., Kalinina S. V., Lemanov V. V. Mekhanizmy teploperenosa v nanozhidkostyakh: sovremennoye sostoyaniye problemy. CH.2. Konvektivnyy teploobmen // Teplofizika i aeromekhanika, 2010. №2 S.173.
7. Rudyak V. YA., Belkin A. A. Modelirovaniye koeffitsiyentov perenosa nanozhidkostey // Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika. 2010. T. 1. №1. S. 156.