

## Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 536.22/.23:621.039

**Морару В.Н.<sup>1</sup>**, канд. хим. наук, **Комыш Д.В.<sup>1</sup>**,  
**Ховавко А.И.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Снигур А.В.<sup>1</sup>**, **Гудков Н.Н.<sup>2</sup>**,  
**Сидоренко Н.А.<sup>2</sup>**, **Маринин А.И.<sup>3</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup> **Институт газа НАН Украины, Киев**

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: vasily.moraru@gmail.com

<sup>2</sup> **Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев**  
пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: invinoveritas78@gmail.com

<sup>3</sup> **Национальный университет пищевых технологий Украины, Киев**  
ул. Владимирская 68, 01033 Киев, Украина, e-mail: a\_marinin@ukr.net

### Наножидкости на основе украинских природных алюмосиликатов — перспективные теплоносители для энергетики

Наряду с наночастицами оксидов и металлов для приготовления наносuspензий энергетического назначения все больше применяют алюмосиликаты. Наноразмерность, разнообразные форма и анизометрия их частиц, высокая гидрофильность поверхности и способность к самопроизвольному диспергированию в водных растворах определяют высокие тепловые параметры таких наножидкостей при использовании их в качестве теплоносителей, особенно при кипении. На установке, питаемой постоянным током, получены кривые кипения наножидкостей в условиях свободной конвекции для водных нанодисперсий четырех природных алюмосиликатов: гидрослюда, монтмориллонита, аттапульгита и генетической смеси двух последних. Изучено влияние кристаллической структуры и анизометрии наночастиц, а также кратности циклов кипения-охлаждения наножидкостей и наличия диспергента на их устойчивость, величину критического теплового потока и состояние поверхности нагрева. Установлено, что наножидкости на основе аттапульгита и его смеси с монтмориллонитом вызывают более сильный рост критического теплового потока (до 2,5–3 раз) и коэффициента теплоотдачи по сравнению с водой, чем наножидкости на основе гидрослюда и монтмориллонита (1,4–1,9 раз) при той же объемной концентрации частиц. Введение в наножидкость 0,05 % (мас.) диспергента приводит к дополнительному росту критического теплового потока и коэффициента теплоотдачи. *Библ. 32, рис. 5, табл. 1.*

**Ключевые слова:** алюмосиликаты, наножидкости, удельный тепловой поток, коэффициент теплоотдачи, диспергент.

Дисперсии наночастиц (НЧ) в базовых жидкостях (традиционных теплоносителях) известны под названием «наножидкости» (НЖ). Исследования последних десятилетий показали, что применение НЖ позволяет в 2–3 раза повысить величину критического теплового потока (КТП) и интенсивность теплоотдачи при кипении по сравнению с базовыми жидкостями (вода, этиленгликоль и др.) [1–7]. Это делает перспективным использование НЖ в качестве хладагентов в системах безопасности важных научных и промышленных объектов.

До настоящего времени надежного объяснения роста КТП в наножидкостях не существует, и данные разных исследователей, касающиеся теплообмена при кипении НЖ, часто противоречивы. Это не удивительно, так как КТП НЖ зависит одновременно от очень многих факторов: химической природы, размера, концентрации и формы НЧ, состояния поверхности нагрева, наличия стабилизатора и др. [1–6]. Например, в работе [8] показано, что в зависимости от угла наклона экспериментальной ячейки величина КТП ( $q_{кр}$ ) при кипении дистиллированной воды изменяется от 0,55 до 1,3 МВт/м<sup>2</sup>, причем максимуму производной отвечает значение  $q_{кр} = 0,7–0,8$  МВт/м<sup>2</sup>, а также показано, что при кипении НЖ происходит отложение НЧ на нагревателе, в результате чего резко изменяется состояние поверхности нагрева. При этом значение КТП зависит от шероховатости поверхности нагрева значительно сильнее, чем от смачиваемости этой поверхности.

Противоречивость данных различных исследователей может быть связана и с тем, что теплопроводность и вязкость изменяют коэффициент теплоотдачи (КТО) НЖ в противоположных направлениях. Вследствие этого одновременное изменение теплопроводности и инкремента вязкости может привести либо к росту, либо к уменьшению КТО ( $\alpha$ ). Причиной расхождения экспериментальных данных является и то обстоятельство, что во многих публикациях приведен первичный размер НЧ, полученный с помощью электронного микроскопа, хотя хорошо известно, что НЧ в НЖ склонны к агрегации.

Согласно [9], относительная важность каждого параметра НЖ может быть оценена по сумме достигнутых показателей. Исходя из этого, технические параметры НЖ могут быть расположены по уменьшению важности для передачи тепла: концентрация частиц > базовая жидкость > размер наночастиц > материал частиц  $\approx$  заряд поверхности > температура  $\approx$  форма частиц > аддитивы > сопротивление Капицы.

Широкое использование процессов кипения объясняется значительно более высокими КТО (2000–50000 Вт/(м<sup>2</sup>·К)) по сравнению с интенсивностью теплоотдачи при конвективном теплообмене без изменения агрегатного состояния [10]. Кипение наступает по мере роста значения теплового потока, и отвод тепла ограничен величиной КТП. При этом КТП отвечает кризису кипения, который характеризуется резким уменьшением КТО в результате образования паровой шубы на поверхности нагрева. Это сопровождается внезапным ростом температуры наружной поверхности нагрева, что повреждает целостность оборудования. В связи с этим чрезвычайно важной задачей является разработка эффективных НЖ, позволяющих не только работать при высоких КТП, но и избежать внезапного наступления кризиса кипения.

Вопросам теплообмена при кипении НЖ в научной литературе посвящено относительно ограниченное число работ [2, 11–22]. Результаты этих исследований показали, что даже очень малые объемные концентрации наночастиц в жидкости (0,001–0,1 % (об.)) приводят к существенному повышению КТП и КТО. При этом теплофизические свойства воды с НЧ (поверхностное натяжение, теплопроводность, вязкость, теплота парообразования, температура кипения) практически не отличаются от теплофизических свойств дистиллированной воды [5, 18]. На этом основании механизм роста КТП объяснили отложением и механизмом наночастиц на поверхности кипения, в результате чего площадь и смачиваемость поверхности теплообмена увеличиваются.

Экспериментальные результаты показывают, что свойства НЖ значительно влияют на величину роста КТП [16, 17]. По мнению авторов [19], это противоречит механизму теплопередачи при пузырьковом кипении НЖ. Интерпретации последнего механизма посвящены работы [20, 21]. Судя по доступным нам источникам, наиболее детально изучены и оценены величины КТП при кипении НЖ на основе оксидов металлов [8, 14–22]. Однако, еще не разработаны НЖ, которые удовлетворяли бы всем техническим требованиям современной энергетики: высокой седиментационной устойчивости, стабильности свойств НЖ против радиации и многократному кипячению-охлаждению в сочетании с высокими технологическими характеристиками, экологичностью и доступностью.

Настоящая работа посвящена исследованию эффективности нового класса теплоносителей — наножидкостей на основе природных алюмосиликатов украинских месторождений. Преимуществом

ществами предлагаемых водно-алюмосиликатных НЖ как теплоносителей являются высокая коллоидная устойчивость и стабильность к многократным циклам кипения-охлаждения, высокие тепловые параметры (КТП, КТО и др.), доступность и дешевизна, экологическая безопасность. Эти достоинства обусловлены высокой гидрофильностью поверхности природных алюмосиликатов, а также кристаллохимией их наночастиц, при которых обеспечиваются высокая энергия их взаимодействия с водой и улучшенные теплофизические свойства НЖ на их основе.

В данной работе на примере модельных водных нанодисперсий четырех природных алюмосиликатов, обладающих различными кристаллической структурой, формой и анизотропией наночастиц, были изучены кривые кипения НЖ на их основе в условиях свободной конвекции.

Цель настоящей работы — изучение влияния анизотропии наночастиц, а также кратности циклов кипения-охлаждения наножидкостей и наличия диспергента на их устойчивость, величину КТП и состояние поверхности нагрева.

Объектами исследования служили водные НЖ на основе природных алюмосиликатов украинских месторождений: монтмориллонита (AlSi-1), аттапульгита (AlSi-5), гидрослюды (AlSi-6), а также генетической смеси монтмориллонита и аттапульгита (AlSi-7). Для сравнения данных была изучена НЖ-8 на основе водной нанодисперсии диоксида титана рутильной модификации с частицами изометричной формы ( $k = l/d \approx 1-3$ ).

Нанофлюиды получали кратковременным (2 мин) ультразвуковым диспергированием на установке УЗДН-2Т  $Ca^{2+}/Na^{+}$ - и  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ -

форм алюмосиликатов в дистиллированной воде и в растворе (0,05 % (мас.)) неорганического диспергента — пирофосфата натрия  $Na_4P_2O_7 \cdot 10 H_2O$ .

Дисперсный состав и  $\zeta$ -потенциал НЖ определяли с помощью лазерного корреляционного спектрометра ZetaSizer NANO-ZS (Malvern Instrument, UK), а поверхностное натяжение — методом пластины Вильгельми (модифицированный тензиометр K6 (KRUSS GmbH, Germany) [23]. Микрорельеф отложений на поверхности нагрева при кипении НЖ изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6700F. Устойчивость исследуемых нанодисперсий была оценена по величинам их электрокинетического  $\zeta$ -потенциала, а также по значениям высоты электростатического барьера отталкивания ( $U/kT$ ) на потенциальных кривых взаимодействия частиц, рассчитанных по уравнениям теории ДЛФО [24, 25]. Физико-химические характеристики и значения критического теплового потока исследованных нанофлюидов при нагреве постоянным током приведены в таблице.

Теплофизические исследования НЖ были выполнены на специально созданном автоматизированном экспериментальном стенде, работающем на постоянном токе и управляемом компьютерной программой, которая позволяет фиксировать с помощью РС в реальном режиме времени все необходимые параметры, включая КТП [26, 27]. В состав измерительной системы, кроме РС, входили аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и нормализаторы сигналов. Последние обеспечивали сведение всех измеряемых сигналов к нормированному виду и фильтрацию, а также линейризацию входных сигналов с датчиков тока и температур. В качестве

### Характеристики исследованных нанофлюидов

Исследуемая жидкость	$d_{cp}$ , нм	C, % (об.)	$k = l/d$	$\sigma$ , мН/м	pH	$\zeta$ , мВ	$U/kT$	$q_{кр} \times 10^{-6}$ , Вт/м <sup>2</sup>
Дистиллированная вода	—	0	—	72,50	6,0	—	—	0,7
AlSi-1	200–700	0,16	10–50	72,55	5,7	–12,5	5	1,22–1,41
AlSi-1dis	150–550	0,16	10–100	71,70	6,95	–35,7	15	1,4–1,68
AlSi-5	150–500	0,60	400–500	72,5	5,5	–19,8	13	1,7–2,03
AlSi-5dis	50–150	0,60	400–800	65,8	6,7	–57,0	$\geq 50$	1,6–2,24
AlSi-6	100–300	0,23	30–100	72,6	5,4	–25,5	14	1,63–2,15
AlSi-6dis	50–150	0,23	30–100	72,2	6,75	–48,0	45	1,35–1,5
AlSi-7	150–500	0,25	400–800	72,7	5,5	–19,7	12	2,50
AlSi-7dis	50–150	0,25	500–800	71,9	6,75	–57,0	$\geq 50$	2,25
НЖ-8 (TiO <sub>2</sub> )	50–100	0,07	1–3	71,8	10,3	–52,5	48	1,35–1,68

Примечание.  $d_{cp}$  — средний размер частиц; C — концентрация частиц; k — средний коэффициент анизотропии частиц;  $\sigma$  — поверхностное натяжение при 20 °С.

АЦП использовались преобразователи с USB портом, что обеспечивало легкость и удобство подключения к компьютеру.

Для определения температуры поверхности нагревателя нами использована зависимость удельного сопротивления нихрома от температуры. Все замеры исходных величин и расчеты параметров (ток, напряжение, критические тепловые потоки, коэффициент теплоотдачи и др.) были выполнены с помощью разработанного программного обеспечения. Компьютерной программой синхронно строились графические зависимости между вышеперечисленными величинами и параметрами в реальном времени.

### Методика эксперимента

Экспериментальная емкость (0,25 л) заполнялась водой или одной из выбранных НЖ. Измерительная ячейка фиксировалась строго горизонтально. Рабочую жидкость предварительно нагревали с помощью вспомогательного нагревателя мощностью 500 Вт. Затем включали основной нагреватель — горизонтально расположенную нихромовую проволоку (марки Х20Н80) диаметром 0,31 мм и длиной 140–145 мм. Входную мощность повышали автоматически до достижения условий кризиса кипения. При достижении пережога нагревателя подачу энергии прекращали. Погрешность измерения КТП не превышала 5 %. До и после эксперимента образцы рабочей жидкости отбирались для измерения поверхностного натяжения,  $\zeta$ -потенциала и pH с целью контроля стабильности НЖ. Полученные величины КТП и КТО для НЖ сравнивались с таковыми для дистиллированной воды.

Для того, чтобы иметь представление о размере НЧ и их распределений по размерам, выполнен гранулометрический анализ. Он показал, что средний размер первичных частиц в нанодисперсиях изученных алюмосиликатов колеблется в пределах  $d = 50\text{--}500$  нм. Соответствующие коэффициенты анизотропии частиц ( $k = l/d$ ) приблизительно составляют 10–800 (см. таблицу).

Во всех нанодисперсиях содержание твердой фазы было значительно ниже точки перколяции, соответствующей резкому увеличению вязкости [28]. За исключением зольей AlSi-5dis, AlSi-6dis и AlSi-7dis все остальные нанодисперсии имели полидисперсный характер распределения частиц по размерам (см. таблицу).

В качестве примера на рис.1 приведены кривые распределения частиц по числу и интенсивности рассеивания света для двух НЖ, полученных на основе гидрослюды и генетической смеси монтмориллонита и аттапульгита. Из него видно,

что в отсутствие стабилизатора суспензии первичные частицы указанных алюмосиликатов имеют тенденцию к агрегации и образованию вторичных агрегатов размером 200–500 нм. При этом их  $\zeta$ -потенциал мал и составляет не более 10–25 мВ.

Введение в суспензии обоих алюмосиликатов всего 0,05 % (мас.) диспергента (рис.1) смещает максимум на кривой распределения частиц в область меньших эквивалентных диаметров (30–100 нм). Это связано с дезагрегацией игольчатых и пластинчатых частиц за счет электростатической стабилизации дисперсии ( $\zeta = -45\text{--}55$  мВ). Последняя обусловлена избирательной адсорбцией четырехзарядных фосфат-анионов диспергента на положительно заряженных ребрах глинистых кристаллов с их перезарядкой и увеличением плотности суммарного отрицательного заряда частиц [29].

Способность повышать КТП при кипении является одним из наиболее замечательных свойств НЖ, которое уже исследовалось во многих работах. Тем не менее, убедительных объяснений механизма этого феномена до сих пор не найдено.

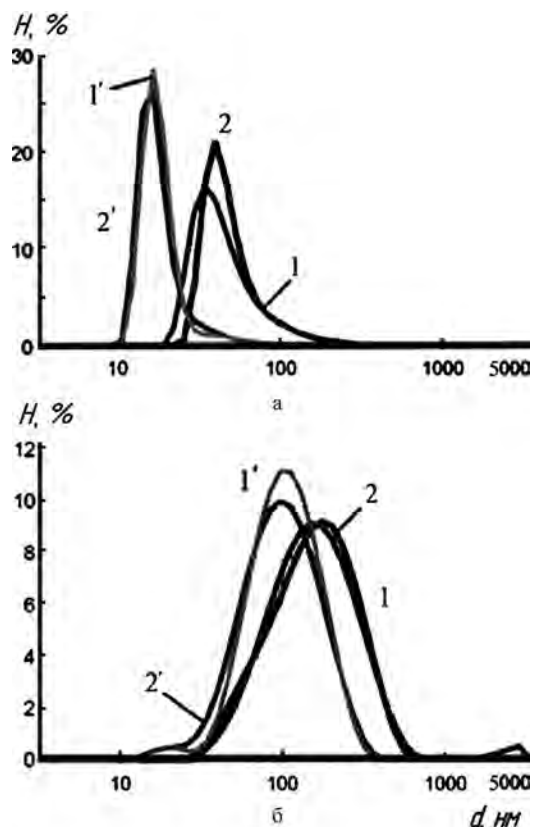


Рис.1. Кривые распределения числа частиц (Н) по размерам (а) и интенсивности рассеивания света (б) для нанодисперсий AlSi-6 (1, 1') и AlSi-7 (2, 2') в дистиллированной воде (1, 2) и в растворе диспергента 0,05 % (мас.)(1', 2').

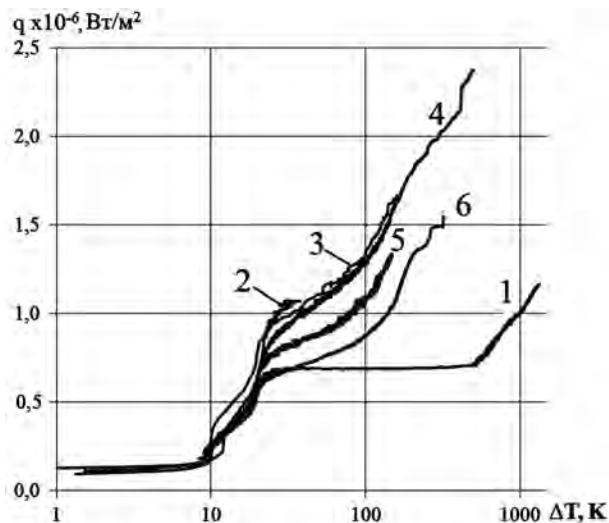


Рис.2. Зависимости удельного теплового потока ( $q$ ) от разности температур нагревателя и НЖ ( $\Delta T$ ) для дистиллированной воды (1) и для нанодисперсий AlSi-1 (2), AlSi-5 (3), AlSi-7 (4), AlSi-6 (6) и  $TiO_2$  (5) на дистиллированной воде.

К факторам, приближающим понимание механизма кипения НЖ, следует отнести форму и анизометрию их НЧ. Например, влияние формы и анизометрии алюмосиликатных НЧ на эффективную теплопроводность суспензий экспериментально изучено в работе [30]. Было показано, что, согласно теории эффективной среды, теплопроводность карбидокремниевых суспензий может быть количественно предсказана.

Сравнение кривых кипения алюмосиликатных НЖ, приведенных на рис.2 и в таблице показывает, что величина КТП тем выше, чем больше коэффициент анизометрии частиц. Так, например, НЖ AlSi-5 и AlSi-7 на основе аттапульгита и его смеси с монтмориллонитом с частицами близкого размера, но с большим коэффициентом анизометрии показывают более сильный рост КТП по сравнению с водой (до 2,5–3 раз), чем НЖ AlSi-6 на основе гидрослюда (1,4–1,9 раз) и  $TiO_2$  с меньшей анизометрией частиц, при близкой объемной концентрации. Такое поведение НЖ при кипении легко объяснимо, если учесть симбатную корреляцию между КТП и шероховатостью поверхности нагрева [8]. Очевидно, что при кипении НЖ с сильно анизометричными частицами вследствие отложения наночастиц поверхность нагревателя приобретает более шероховатый характер, чем при кипении НЖ с частицами изометричной (круглой) формы [8].

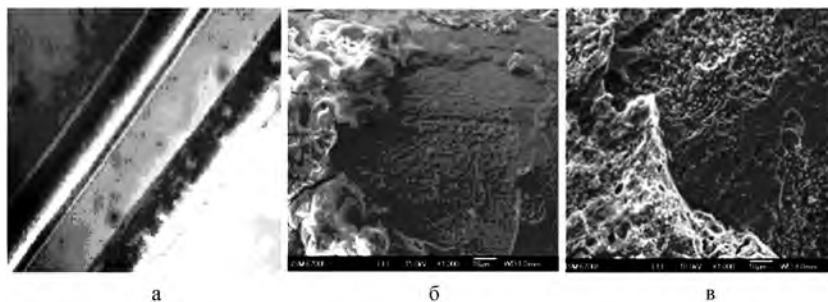


Рис.3. Фотоизображения поверхности нагревателя ( $d = 0,31$  мм) после кипения в дистиллированной воде и в нанодисперсии AlSi-5 (а); ESM-изображения поверхности нагрева после кипения нанодисперсий на основе AlSi-6 (б) и  $TiO_2$  (в).

Поскольку химия поверхности изученных алюмосиликатов почти тождественна, то смачиваемость поверхности нагрева, покрытой частицами различных AlSi, практически одинакова, и ее вклад в увеличении КТП одинаков для всех алюмосиликатных НЖ. Но даже если рост КТП в нанодисперсиях обязан вкладу от обоих факторов (смачиваемости и шероховатости поверхности), эффект шероховатости всегда более сильный и более доминирующий, чем влияние контактного угла смачивания [8]. Это, по-видимому, объясняется тем, что шероховатость резко увеличивает количество парообразующих центров и площадь поверхности теплообмена.

Что касается влияния формы наночастиц на эффективность НЖ как теплоносителей, то, как показали наши исследования (см. таблицу), максимальные КТП были зарегистрированы для НЖ AlSi-5 и AlSi-7 с игольчатой и чешуйчатой формой частиц и их природной смеси.

Изменения других теплофизических свойств НЖ (вязкость, поверхностное натяжение) по сравнению с водой очень малы (см. таблицу), поэтому их влиянием на КТП можно пренебречь, так как они не могут быть главной причиной роста КТП.

С целью выяснения механизма, связанного с повышением КТП, нами был проведен анализ рельефа поверхности нагревателя с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопа (рис.3).

При кипении дистиллированной воды поверхность нагревателя оставалась чистой, а при кипении всех НЖ в разной степени происходило отложение осадка из наночастиц на ней (рис.3). Для того, чтобы судить о структуре слоя осажденных частиц, приведены ESM-изображения поверхности нагрева после кипения исследуемых НЖ, из которых четко прослеживается высокая шероховатость и пористость каркаса, образованного укладкой агломератов частиц в процессе кипения. Поэтому очевидно, что величина КТП зависит в основном от со-

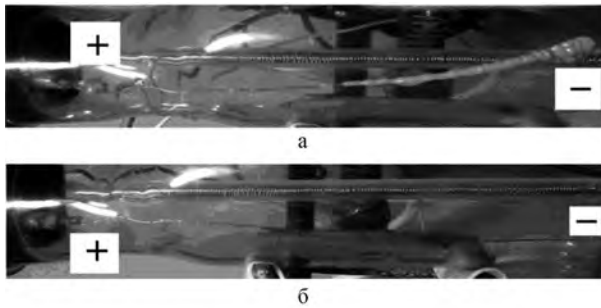


Рис.4. Влияние диспергента (концентрация 0,05 % (мас.)) на состояние поверхности нагревателя после кипения в AlSi-5 (а) и в AlSi-5dis (б).

стояния поверхности нагрева. Как отмечается многими авторами [8, 13, 15, 16, 18], пористый слой из наночастиц, отложенных на поверхности нагрева, вероятней всего, ответственен за рост КТП при кипении НЖ, так как способствует развитию устойчивого пузырькового режима кипения.

Кроме рассмотренных выше факторов, заслуживает внимания вопрос о роли диспергентов при кипении НЖ. Влияние этого фактора на КТП было детально рассмотрено в [24] при кипении в условиях свободной конвекции аттапульгитовых НЖ (AlSi-2, AlSi-4) в установке с проволочным нихромовым нагревателем, питаемым переменным током. Установлено, что незначительные добавки диспергента (пирофосфата натрия) к AlSi-2, AlSi-4 приводят к двукратному росту КТП и КТО ( $\alpha_{кр}$ ) по сравнению с базовой жидкостью (водой). Следовательно, в данном случае введение диспергента в НЖ улучшало их теплофизические характеристики как теплоносителей.

В работе [24] пришли к выводу, что механизм роста КТП в этом случае связан с повышением степени дисперсности НЧ, а также с возникновением пористой структуры осадка из наночастиц AlSi-2, AlSi-4 вокруг нагревателя, вызванным калгон-эффектом от присутствия диспергента.

Как выяснилось, характер влияния диспергента на тепловые параметры кипения НЖ зависит от рода электрического тока нагрева (переменный или постоянный) и структуры НЧ. Например, при кипении аналогичных нанодисперсий AlSi в установке, питаемой постоянным током, обильный гелеобразный осадок вокруг нагревателя образуется только в НЖ без диспергента (рис.4, а), причем в этих случаях величина КТП даже несколько выше, чем у нанодисперсий AlSi-dis, содержащих диспергент, и в 2,5 раза превосходит КТП дистиллированной воды (см. таблицу).

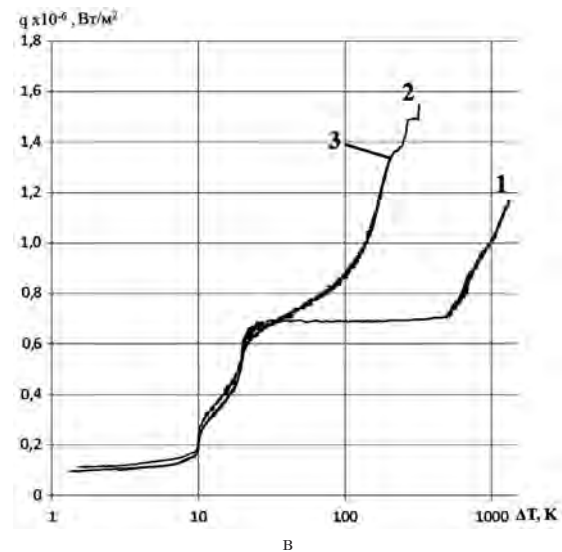
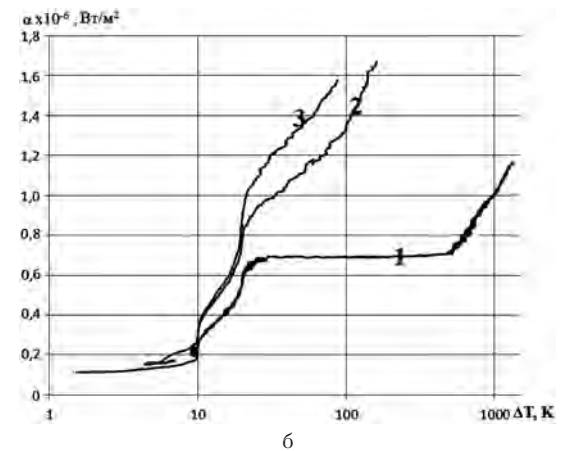
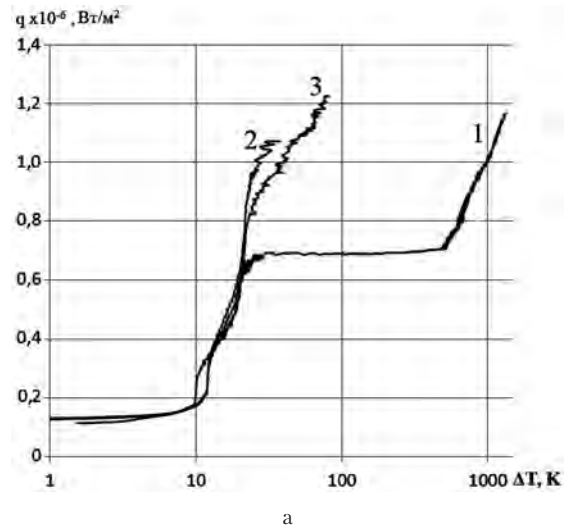


Рис.5. Влияние диспергента (концентрация 0,05 % (мас.)) на характер кривых кипения наножидкостей AlSi-1 (а), AlSi-5 (б), AlSi-6 (в): 1 – дистиллированная вода; 2 – без диспергента; 3 – с добавкой диспергента.

Как следует из рис.4, 5, введение диспергента имеет следующие преимущества: 1) при прочих равных тепловых нагрузках в докритической области кипения удельный тепловой поток значительно выше для НЖ, содержащих диспергент; 2) так как добавка диспергента препятствует осаждению наночастиц на поверхности нагрева и падению их концентрации в НЖ, то это позволяет длительно сохранять эксплуатационные характеристики НЖ, то есть повысить их долговечность.

Кроме того, из сравнения кривых кипения на рис.5 видно, что добавка диспергента не всегда приводит к росту КТП. Например, в случае нанодисперсии гидрослюды AlSi-6 (рис.5, в) диспергент практически не влияет на КТП, что объясняется особенностями ее кристаллохимического строения [32].

В ходе исследований было обращено внимание на то, что НЖ на основе аттапульгита более стабильны к длительному и многократному кипячению-охлаждению и к коагулирующему действию постоянного тока по сравнению с НЖ на основе монтмориллонита. С другой стороны, НЖ на основе алюмосиликатов (аттапульгита, гидрослюды и монтмориллонита) несравненно более стабильны к длительному и многократному кипячению-охлаждению, чем НЖ на основе различных углеродных материалов. Установлено, что после 60-минутного кипения алюмосиликатные НЖ становятся еще более устойчивыми в результате дальнейшего диспергирования, а углеродные НЖ полностью коагулируют и осаждаются. Эта важная для практики особенность алюмосиликатных НЖ, вероятно, связана со спецификой кристаллохимической структуры минералов и топографии (характера распределения) зарядов на поверхности их частиц [32], а также с их высокой гидрофильностью.

Особенностью теплообмена с участием алюмосиликатных НЖ является то, что с увеличением кратности кипячения величина КТП возрастает до определенного предела, выходя на постоянное значение после 3-го цикла кипения. Это указывает на связь механизма интенсификации теплоотдачи с дисперсным состоянием НЖ и структурой осадка на поверхности нагрева [27]. Возможно, что при длительном кипении НЖ на поверхности проволоки образуется оптимальный по степени влияния на КТП слой наночастиц.

### Выводы

В автоматическом режиме получены кривые кипения для ряда водно-алюмосиликатных

наножидкостей и определены величины их КТП, которые в 1,5–3 раза превосходят КТП базовой жидкости (воды).

Обнаружено, что величина КТП при кипении алюмосиликатных НЖ тем выше, чем больше коэффициент анизотропии наночастиц. Это, по-видимому, объясняется тем, что при кипении НЖ с сильно анизометричными частицами поверхность нагревателя приобретает более шероховатый характер, а шероховатость увеличивает количество парообразующих центров и площадь поверхности теплообмена.

Показано, что введение диспергента в НЖ не только повышает удельный тепловой поток, но и препятствует чрезмерному осаждению наночастиц на поверхности нагрева и падению их концентрации в НЖ, что позволяет длительно сохранять эксплуатационные характеристики НЖ, то есть повысить их долговечность.

Установлено, что НЖ на основе аттапульгита более стабильны к длительному и многократному кипячению-охлаждению и к коагулирующему действию постоянного тока по сравнению с НЖ на основе монтмориллонита, что обусловлено их различным кристаллическим строением.

Получено убедительное доказательство того, что рост величины КТП при кипении НЖ по сравнению с водой связан с изменением природы и микрорельефа поверхности нагрева.

Перечисленные преимущества алюмосиликатных НЖ позволяют считать их перспективными теплоносителями для энергетики.

### Список литературы

1. Xuan Y., Li Q. Heat transfer in nanofluids (Review) // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2000. — Vol. 21, № 1. — P. 58–64.
2. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2003. — № 46. — P. 851–862.
3. Buongiorno, J. Convective Transport in Nanofluids // Journal of Heat Transfer. — 2006. — № 128. — P. 240–250.
4. Das S.K., Choi S.U. S., Patel H.E. Heat transfer in nanofluids (Review) // Heat Transfer Engineering. — 2006. — Vol. 27, № 10. — P. 3–19.
5. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Study of pool boiling and critical heat flux enhancement in nanofluids // Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences. — 2007. — Vol. 55, № 2. — P. 211–216.
6. Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U. S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements // Heat Transfer Engineering. — 2008. — Vol. 29, № 5. — P. 432–460.

7. Choi S.U.S. Nanofluids: from vision to reality through research // *Journal of Heat Transfer*. – 2009. – Vol. 131, № 3. – P. 1–9.
8. Pham Q.T., Kim T.I., Lee S.S., Chang S.H. Enhancement of critical heat flux using nano-fluids for In-vessel Retention-External Vessel Cooling // *Applied Thermal Engineering*. – 2012. – Vol. 35. – P. 157–165.
9. Timofeeva E.V., Yu Wenhua, France D.M., Singh Dileep, Roubort J.L. Nanofluids for heat transfer: an engineering approach // *Nanoscale Research Letters*. – 2011, 6:182 doi:10.1186/1556-276X-6-182. The electronic version of this article is the complete one and can be found online at: – <http://www.nanoscalereslett.com/cont/6/1/182>
10. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
11. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling of nanofluids on horizontal narrow tubes // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2003. – № 29. – P. 1237–1247.
12. Tsai C.Y., Chien H.T., Ding P.P., Chan B., Luh T.Y., Chen P.H. Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance // *Materials Letters*. – 2003. – № 58. – P. 1461–1465.
13. You S.M., Kim J.H., Kim K.H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 8. – P. 3373–3376.
14. Vassallo P., Kumar R. and Damico S. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – № 47. – P. 407–411.
15. Bang I.C., Chang S.H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids from a plain surface in a pool // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48. – P. 2407–2419.
16. Kim H., Kim J., Kim M. Experimental study on CHF characteristics of water – TiO<sub>2</sub> nanofluids // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2006. – № 38. – P. 61–68.
17. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89, № 15. – P. 153107.
18. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – Vol. 50, № 19–20. – P. 4105–4116.
19. Yulong Ding, Haisheng Chen, Liang Wang, Chane-Yuan Yang, Yurong He, Wei Yang, Wai Peng Lee, Lingling Zhang and Ran Huo. Heat Transfer Intensification Using Nanofluids // *KONA*. – 2007. – № 25. – P. 23–36.
20. Wen D.S. and Ding Y.L. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -Alumina nanofluids // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2005. – № 7. – P. 265–274.
21. Wen D.S., Ding Y.L. and Williams R.A. Pool boiling heat transfer of aqueous based TiO<sub>2</sub> nanofluids // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2006. – № 13. – P. 231–244.
22. Фокин Б.С., Беленький М.Я., Альмяшев В.И. и др. Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц // *Письма в Журнал технической физики*. – 2009. – Т. 35, № 10. – С. 1–5.
23. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
24. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sidorenko S.V., Komyshev D.V., Khovavko A.I. Nanofluids for Energetics : Effect of Stabilization on the Critical Heat Flux at Boiling // *Technical Physics Letters*. – 2012. – Vol. 38, №9. – P. 856–860.
25. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. – М.: Наука, 1986. – 206 с.
26. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komyshev D.G. Specialized Test Unit for Investigation of the Critical Heat Flux with Nanofluids Boiling // *Book of Abstracts 2-nd Conf. on AMN-APLOC, (Singapore, 5–7 January 2011)*. – Singapore, 2011. – 74 p.
27. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Iliencko B.K., Khovavko A.I., Komyshev D.V., Panov E.M., Sydorenko S.V., Snigur O.V. Study of a heat transfer mechanism and critical heat flux at nanofluids boiling // *International Journal of Energy for a Clean Environment*. – 2013. – Vol. 2–3, № 14. – P. 151–168.
28. Moraru V.N., Lebovka N.I., Chevchenko D.G. Structural transitions in aqueous suspensions of natural graphite // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. – 2004. – Vol. 242. – P. 181–187.
29. van Olphen H. An Introduction to Clay Colloid Chemistry. New York : A Wiley – Interscience Publ. John Wiley Sons, 1977. – 318 p.
30. Cherkasova A.S., Shan J.W. – <http://dx.doi.org/10.1115/1.2928050> // *Journal of Heat Transfer*. – 2008. – Vol. 130, № 8, Article ID 082406. – 7 p.
31. Nan C.-W., Birringer R., Clarke D. R., Gleiter H. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – Vol. 81, № 10. – P. 6692–6699.
32. Тарасевич Ю.И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. – Киев : Наук. думка, 1988. – 248 с.

Поступила в редакцию 02.02.15



**Морару В.Н.<sup>1</sup>**, канд. хім. наук, **Комиш Д.В.<sup>1</sup>**,  
**Ховавко О.І.<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Снігур О.В.<sup>1</sup>**, **Гудков М.М.<sup>2</sup>**,  
**Сидоренко М.А.<sup>2</sup>**, **Маринін А.І.<sup>3</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup> **Інститут газу НАН України, Київ**

*вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: vasily.moraru@gmail.com*

<sup>2</sup> **Національний технічний університет України «КПІ», Київ**

*пр. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: invinoveritas78@gmail.com*

<sup>3</sup> **Національний університет хімічних технологій України, Київ**

*вул. Володимирська, 68, 01033 Київ, Україна, e-mail: a\_marunin@ukr.net*

## **Нанорідини на основі українських природних алюмосилікатів — перспективні теплоносії для енергетики**

Поряд з наночастинками оксидів та металів для приготування наносуспензій енергетичного призначення все більше застосовують алюмосилікати. Нанорозмірність, різноманітна форма та анізотропія їх часток, висока гідрофільність поверхні та здатність до самодовільного диспергування у водних розчинах зумовлюють високі теплові параметри таких нанорідин як теплоносії, особливо при кипінні. На установці, що живиться постійним струмом, отримано криві кипіння нанорідин в умовах вільної конвекції для водних нанодисперсій чотирьох природних алюмосилікатів: гідроліди, монтмориллоніта, атапультита та генетичної суміші двох останніх. Вивчено вплив кристалічної структури та анізотропії наночастинок, а також кратності кип'ятіння-охолодження нанорідин та наявності диспергента на їх стійкість, величину критичного теплового потоку та стан поверхні нагріву. Встановлено, що нанорідини на основі атапультитів та його суміші з монтмориллонітом викликають більш сильне зростання критичного теплового потоку (до 2,5–3 разів) та і коефіцієнта тепловіддачі у порівнянні з водою, ніж нанорідини на основі монтмориллоніту (1,4–1,9 разів) при тій самій об'ємній концентрації частинок. Введення в нанорідину 0,05 % (мас.) диспергента призводить до додаткового зростання критичного теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі. *Бібл. 32, рис. 5, табл. 1.*

**Ключові слова:** алюмосилікати, нанорідина, питомий тепловий потік, коефіцієнт тепловіддачі, диспергент.

**Moraru V.N.<sup>1</sup>, Candidate of Chemical Sciences, Komysch D.V.<sup>1</sup>,  
Khovavko A.I.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Snigur O.V.<sup>1</sup>,  
Gudkov N.N.<sup>2</sup>, Sydorenko N.A.<sup>2</sup>,  
Marinin A.I.<sup>3</sup>, Candidate of Technical Sciences**

<sup>1</sup> **The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev**

39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: vasily.moraru@gmail.com

<sup>2</sup> **National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Kiev**

37, Pobedy Ave., 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: invinoveritas78@gmail.com

<sup>3</sup> **National University of Food Technologies of Ukraine, Kiev**

68, Vladimirska Str., 01033 Kiev, Ukraine, e-mail: a\_marinin@ukr.net

## Nanofluids on the Basis of Ukrainian Natural Aluminosilicates are Promising Heat-Carriers for Power Engineering

Ukrainian natural aluminosilicates – montmorillonite, attapulgite and their genetic mixture with montmorillonite with scaly, plate-like and needle shape of nanoparticles were used to create nanodispersions for energetics. The nanodimension, the different form and anisometry of their particles, high wetting ability of surface and the ability to spontaneous dispersion in water solutions – all these characteristics predetermine high heat parameters of these nanofluids as heat agents especially at boiling. The boiling curves of nanofluids in conditions of free convection have been obtained. The aim of this study is to investigate the influence of nanoparticles shape (anisometry), as well as ratio of nanofluids boiling-cooling and presence of dispersants on their stability, critical heat flux and the state of the heating surface. It was found that attapulgite nanofluid with particles of similar size, but having a greater anisometry, causes a stronger increase of critical heat flux (up to 2,5–3 times) than the montmorillonite nanofluid (1,4–1,9 times) with the same particles volume concentration. *Bibl. 32, Fig. 5, Table 1.*

**Key words:** aluminosilicates, nanofluids, specific heat flux, dispersant.

### References

1. Xuan Y. and Li Q. Heat transfer in nanofluids (Review), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21 (1), pp. 58–64.
2. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, (46), pp. 851–862.
3. Buongiorno, J. Convective Transport in Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128 (3), pp. 240–250.
4. Das S. K., Choi S. U. S., and Patel H. E. <http://dx.doi.org/10.1080/01457630600904593> Heat transfer in nanofluids (Review), *Heat Transfer Engineering*, 2006, 27 (10), pp. 3–19.
5. Kim S. J., Bang I. C., Buongiorno J., and Hu L. W. Study of pool boiling and critical heat flux enhancement in nanofluids, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 2007, 55 (2), pp. 211–216.
6. Yu W., France D.M., Routbort J.L., and Choi S.U.S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements, *Heat Transfer Engineering*, 2008, 29 (5), pp. 432–460.
7. Choi S.U.S. Nanofluids: from vision to reality through research, *Journal of Heat Transfer*, 2009, 131 (3), pp. 1–9.
8. Pham Q.T., Kim T.I., Lee S.S., Chang S.H. Enhancement of critical heatflux using nanofluids for Invesel Retention-External Vessel Cooling, *Applied Thermal Engineering*, 2012, 35, pp. 157–165.
9. Timofeeva Elena V., Yu Wenhua, France David M., Singh Dileep and Routbort Jules L. Nanofluids for heat transfer: an engineering approach, *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6:182 doi:10.1186/1556-276X-6-182. The electronic version of this article is the complete one and can be found online at: – [http://www. nanoscalereslett.com/content/6/1/182](http://www.nanoscalereslett.com/content/6/1/182)
10. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena. Moscow : Atomizdat, 1979, 416 p. (Rus.)
11. Das S.K., Putra N. and Roetzel W. Pool boiling of nanofluids on horizontal narrow tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, (29), pp.1237–1247.
12. Tsai C.Y., Chien H.T., Ding P.P., Chan B., Luh T.Y. and Chen P.H. Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, *Materials Letters*, 2003, (58), pp. 1461–1465.
13. You S.M., Kim J.H. and Kim K.H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool

- boiling heat transfer, *Applied Physics Letters*, 2003, 8, pp. 3373–3376.
14. Vassallo P., Kumar R. and Damico S. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, (47), pp. 407–411.
  15. Bang I.C. and Chang S.H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids from a plain surface in a pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48, pp. 2407–2419.
  16. Kim H., Kim J. and Kim M. Experimental study on CHF characteristics of water-TiO<sub>2</sub> nanofluids, *Nuclear Engineering and Technology*, 2006, (38), pp. 61–68.
  17. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J. and Hu L.W. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids, *Applied Physics Letters*, 2006, 89 (15), pp. 153107.
  18. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50 (19–20), pp. 4105–4116.
  19. Yulong Ding, Haisheng Chen, Liang Wang, Chanyuan Yang, Yurong He, Wei Yang, Wai Peng Lee, Lingling Zhang and Ran Huo. Heat Transfer Intensification Using Nanofluids, *KONA*, 2007, (25), pp. 23–36.
  20. Wen D.S. and Ding Y.L. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -Alumina nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, 2005, (7), pp. 265–274.
  21. Wen D.S., Ding Y.L. and Williams R.A. Pool boiling heat transfer of aqueous based TiO<sub>2</sub> nanofluids. // *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2006, (13), pp. 231–244.
  22. Fokin B.S., Belen'kij M.Ja., Al'mjashev V.I. i dr. Kriticheskij teplovoj potok pri kipenii vodnoj dispersii nanochastic, *Technical Physics Letters*, 2009, 35 (10), pp. 1–5.
  23. Adamson A. Fizicheskaja himija poverhnostej. Moscow : Mir, 1979, 568 p. (Rus.)
  24. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sidorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I. Nanofluids for energetics : Effect of Stabilization on the Critical Heat Flux at Boiling, *Technical Physics Letters*, 2012, 38 (9), pp. 856–860.
  25. Derjagin B.V. Teorija ustojchivosti kolloidov i tonkih plenok. Moscow : Nauka, 1986, 206 p. (Rus.)
  26. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.G., Specialized Test Unit for Investigation of the Critical Heat Flux with Nanofluids Boiling. *Book of Abstracts 2-nd Conf. on AMN-APLOC*, (Singapore, 5–7 Jan. 2011), 2011, p. 74.
  27. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Iliencko B.K., Khovavko A.I., Komysh D.V., Panov E.M., Sydorenko S.V., Snigur O.V. Study of a heat transfer mechanism and critical heat flux at nanofluids boiling, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2013, 2–3 (14), pp. 151–168.
  28. Moraru V.N., Lebovka N.I., Chevchenko D.G. Structural transitions in aqueous suspensions of natural graphite, *Colloids and Surfaces A. : Physicochem. Eng. Aspects*, 2004, 242, pp.181–187.
  29. *van Olphen H.* An Introduction to Clay Colloid Chemistry. New York: A Wiley - Interscience Publ. John Wiley Sons, 1977, 318 p.
  30. Cherkasova A.S. and Shan J.W. — <http://dx.doi.org/10.1115/1.2928050>, *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130 (8), Article ID 082406, 7 p.
  31. Nan C.-W., Birringer R., Clarke D. R., and Gleiter H. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance, *Journal of Applied Physics*, 1997, 81 (10), pp. 6692–6699.
  32. Tarasevich Yu.I. Stroenie i himija poverhnosti sloistyh silikatov, Kiev : Naukova dumka, 1988, 248 p. (Rus.)

Received February 2, 2015