

Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 536.22/.23:621.039

Морару В.Н.¹, канд. техн. наук, **Комыш Д.В.¹**, **Ховавко А.И.¹**,
канд. техн. наук, **Снигур А.В.¹**, **Гудков Н.Н.²**, **Сидоренко Н.А.²**

¹ **Институт газа НАН Украины, Киев**

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

² **Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев**

пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: invinoveritas78@gmail.com

Влияние состояния поверхности нагрева на интенсивность теплоотдачи при кипении наножидкостей

Кипение жидкостей широко применяется в теплообменном оборудовании, так как характеризуется интенсивной теплоотдачей, особенно при использовании наножидкостей в качестве теплоносителей. При этом на поверхности нагрева происходит самопроизвольное образование наноструктур различной архитектуры, пористости и шероховатости, что создает условия для резкой интенсификации теплообмена. В ходе лабораторных экспериментов были выяснены закономерности между интенсивностью теплоотдачи при кипении наножидкостей и характером наноструктурных отложений на поверхности нагрева. Для исследования кипения наножидкостей создана автоматизированная установка и программное обеспечение, позволяющее снимать рабочие характеристики и управлять процессом в реальном времени. На основе анализа экспериментального материала (графические зависимости, видеосъемка, порометрия, SEM-изображения) сделан вывод о том, что максимальные значения тепловых параметров при кипении (удельный тепловой поток q и коэффициент теплоотдачи α) зарегистрированы для наножидкостей, полученных на основе смесей наночастиц сильно анизометричной формы. *Библ. 20, рис. 4, табл. 2.*

Ключевые слова: наножидкости, теплообмен, поверхность нагрева, осадок.

Так называемые «наножидкости» (НЖ) — это новое поколение теплоносителей, представляющих собой коллоидные дисперсии наночастиц (НЧ) в обычных жидкостях таких, как вода, этиленгликоль, масла и др. Благодаря их повышенной теплопроводности и аномально высокой теплоотдаче при кипении НЖ чрезвычай-

но перспективны для охлаждения различного энергетического оборудования (например, ядерных реакторов и др.). Интересная особенность НЖ заключается в том, что в процессе их кипения на поверхности нагрева происходит самопроизвольное образование наноструктур различной архитектуры, пористости и шероховато-

сти, что вызывает резкую интенсификацию теплообмена. Например, максимально достижимый удельный тепловой поток ($q_{кр}$) при кипении водной НЖ может возрасти на 300–400 % по сравнению с обычной водой и достичь величины $(3-4) \cdot 10^6$ Вт/м², а максимальное значение коэффициента теплоотдачи (α) может превысить 50000 Вт/(м²·К) [1]. Нами было обнаружено, что формирующийся пористый слой на поверхности нагревателя способен отодвинуть феномен кризиса кипения, чреватый пережогом и выходом из строя оборудования [2]. Предполагается, что все эти положительные эффекты связаны с изменением величины и природы поверхности теплообмена (ее смачиваемости и шероховатости) и что именно пористая структура и свойства отложенного слоя во многом определяют тепловые параметры, характеризующие теплоотдачу при кипении нанофлюидов.

Влияние смачиваемости поверхности нагрева на интенсивность теплообмена и на критический тепловой поток (КТП) при кипении были предметом многочисленных исследований. Известно, что КТП резко уменьшается на гидрофобных поверхностях, а гидрофильные поверхности характеризуются более высокими коэффициентами теплоотдачи и более высокими значениями КТП [3–5]. Достижения в области исследований по изменению поверхностной энергии твердых тел, описанные в работе [6], открыли новые возможности для повышения теплоотдачи при кипении вследствие уменьшения краевого угла смачивания за счет создания наноструктур на поверхности нагрева [7].

На существование такой связи обратили внимание и другие исследователи. Так, например, в работах [8–10] показано, что при пузырьковом кипении НЖ на основе оксидов алюминия, циркония и кремния некоторые наночастицы оседают на поверхности нагрева и формируют пористый слой, приводящий к значительному росту КТП. Доказано, что этот слой значительно повышает смачиваемость поверхности нагрева, что подтверждено уменьшением контактного угла смачивания этой поверхности после кипения НЖ по сравнению с поверхностями после кипения дистиллированной воды [8–10]. Уменьшение контактного угла смачивания связано с изменением поверхностной энергии и морфологии поверхности, вызванными наличием слоя НЧ. На основании существующих теорий горячих или сухих пятен [11] в работах [9, 10] отмечено, что между повышением КТП и улучшением смачиваемости поверхности имеется прямая связь. Результаты оценочных расчетов роста КТП по мере умень-

шения контактного угла смачивания хорошо согласуются с величинами, полученными в эксперименте.

В работе [12] на примере водных НЖ с наночастицами Al₂O₃ и углеродных нанотрубок (УНТ) показано, что для получения высоких величин КТП и коэффициента теплоотдачи при кипении не обязательно, чтобы поверхность нагревателя была покрыта сплошным слоем НЧ и обладала высокой смачиваемостью, хотя последнее тоже важно для теплоотдачи. Более важным параметром для интенсивного теплообмена оказалась шероховатость отложенного на поверхности нагрева слоя из НЧ, хотя известно [6], что рост шероховатости также улучшает смачиваемость поверхностей.

Согласно [12], в случае комбинированного нанофлюида (Al₂O₃ + УНТ) действуют одновременно оба фактора (улучшение смачиваемости и рост шероховатости поверхности), и это приводит к наиболее высокому значению КТП среди всех трех нанофлюидов. Анализ данных по КТП, полученных в данной работе, показал, что чем выше шероховатость, тем больше КТП, независимо от контактного угла.

Даже если рост КТП при кипении нанофлюида вызван обоими факторами (смачиваемостью и шероховатостью поверхности), эффект шероховатости будет более сильным и доминирующим, чем влияние контактного угла смачивания. Это, вероятно, имеет место потому, что рост шероховатости поверхности нагрева увеличивает не столько площадь теплообмена, а главным образом рост плотности центров парообразования.

Проведенные исследования подтвердили важность улучшения смачиваемости поверхности и формирования шероховатых наноструктур на поверхности нагревателя как эффективного метода повышения теплоотдачи при кипении.

За последнее десятилетие значительное число исследований показало, что для НЖ характерны повышенные (на 10–35 %) величины теплопроводности по сравнению с таковыми для базовых жидкостей (вода, этиленгликоль) [13–16] и что использование наножидкостей в качестве теплоносителей позволяет достичь высоких значений КТП и коэффициента теплоотдачи (КТО) при кипении [8–10, 17–20]. Несмотря на это отмеченный рост теплопроводности не может объяснить аномально высокую (более 200 %) теплоотдачу при кипении НЖ по сравнению с водой. Опыты показали, что повышенные величины $q_{кр}$ и α при кипении НЖ определяются в основном состоянием поверхности нагрева, ее топологическими и химическими свойствами.

С целью выяснения связи между интенсивностью теплоотдачи при кипении НЖ и характером наноструктурных отложений на поверхности нагрева нами изучены кривые кипения различных НЖ, детально исследована топография отложенных покрытий, их пористая структура и полученные результаты сопоставлены с величинами основных тепловых параметров кипения $q_{кр}$ и α .

На основе анализа экспериментального материала (графических зависимостей, SEM-изображений наноструктурных отложений, порометрических данных) получена интересная информация о влиянии формы и анизотропии наночастиц на микрорельеф поверхности и интенсивность теплообмена, важная для практического применения НЖ.

Объектами исследования служили водные нанофлюиды на основе природных алюмосиликатов украинских месторождений: аттапульгита (AlSi-5), гидрослюды (AlSi-6), генетической смеси монтмориллонита и аттапульгита (AlSi-7), а также диоксида титана рутильной модификации (TiO_2); для сравнения изучена НЖ на основе смеси алюмосиликатов с углеродными нанотрубками (AlSi-7 + УНТ).

Нанофлюиды получали путем кратковременного (2 мин) ультразвукового диспергирования на установке УЗДН-2Т соответствующих микропорошков в дистиллированной воде без применения диспергента.

Дисперсный состав и ζ -потенциал НЖ определяли с помощью лазерного корреляционного спектрометра ZetaSizer NANO-ZS (Malvern Instrument, UK), а поверхностное натяжение — методом пластинки Вильгельми (модифицированный тензиометр K6 KRUSS GmbH, Germany). Устойчивость исследуемых нанодисперсий, оцененная по величинам их ζ -потенциала и седиментационным методом, была вполне удовлетворительная для измерения тепловых параметров.

Теплофизические исследования НЖ были выполнены на специально созданном автоматизированном экспериментальном стенде, работающем на постоянном токе и управляемом гибкой компьютерной программой, которая позволяет фиксировать с помощью РС необходимые параметры (ток, напряжение, тепловые потоки, коэффициент теплоотдачи и др.) и выполнять регулирование тепловой нагрузки в широком диапазоне. Для определения температуры поверхности нагревателя нами использована зависимость удельного сопротивления нихрома от температуры. Компьютером синхронно строились графические зависимости между

основными вышеперечисленными величинами и параметрами в реальном времени [1–3].

Микрорельеф отложений на поверхности нагрева при кипении НЖ изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6700F, а порометрические измерения покрытий были выполнены на порометре QuantaChrome® AsiQwin™.

Механизм образования наноструктур на поверхности нагрева во многом напоминает образование накипи на поверхности нагревателя с тем отличием, что в первом случае процесс одностадийный, то есть при пузырьковом кипении наножидкости НЧ напрямую осаждаются на поверхности (возле центров парообразования), а во втором случае процесс многостадийный. Сначала в объеме жидкости при подъеме температуры имеет место разложение молекул растворимых гидрокарбонатов Ca, Mg, Fe и др., их коагуляция в более крупные частицы нерастворимых карбонатов, а затем их отложение на поверхности нагрева. В первом случае возникают более или менее пористые осадки, а во втором — отложения накипи, имеющие плотную структуру с высоким термическим сопротивлением, вызывающие резкое уменьшение теплоотдачи и перегрев нагревателя.

Нами обнаружено, что отложение частиц и формирование наноструктур на поверхности нагрева наблюдается уже в докризисной области пузырькового кипения водных наножидкостей ($q_{кр} < 0,7 \text{ МВт/м}^2$).

На ход процесса кипения и характер образующегося осадка влияют такие факторы: химическая природа, форма и анизотропия частиц НЖ и др.

На рис.1–3 приведены кривые кипения и соответствующие зависимости коэффициента теплоотдачи α от разности температур (ΔT) для кипящих НЖ, образующих на поверхности теплообмена наноструктурированную архитектуру, изображенную на рис.4. Физико-химические характеристики и значения тепловых параметров исследованных нанофлюидов представлены в табл.1.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о влиянии топографии осадков, отложенных на поверхности нагрева при кипении НЖ, на форму кривых кипения и интенсивность теплоотдачи. Очевидно, что отложение частиц оксидов и алюмосиликатов на металлической поверхности нагрева делают ее более гидрофильной и шероховатой, что подтверждается уменьшением краевого угла смачивания θ [12] и SEM-изображениями поверхностных отложений (см. рис.4). А повышение смачиваемо-

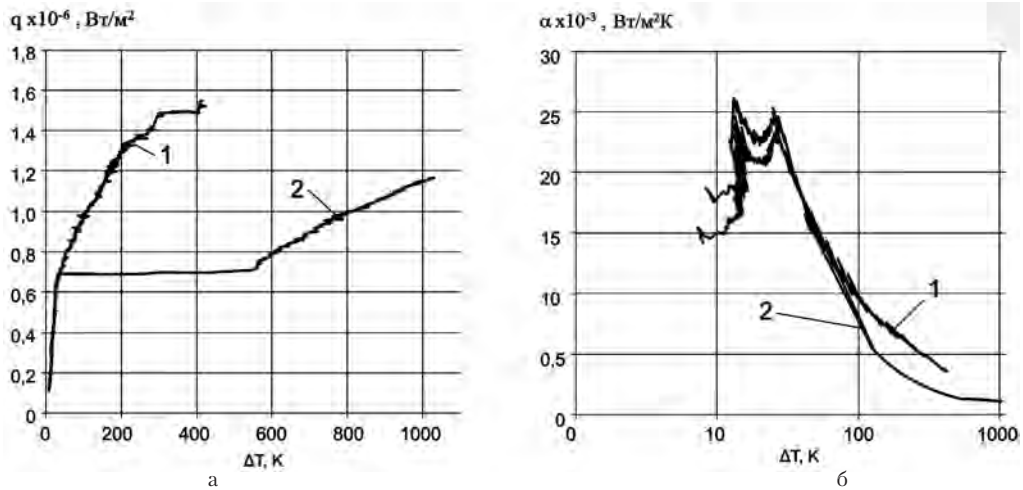


Рис.1. Кривые кипения (а) и коэффициенты теплоотдачи (б) в зависимости от разности температур стенки и кипящей жидкости (ΔT) для наножидкости на основе гидрослюды (1) и дистиллированной воды (2).

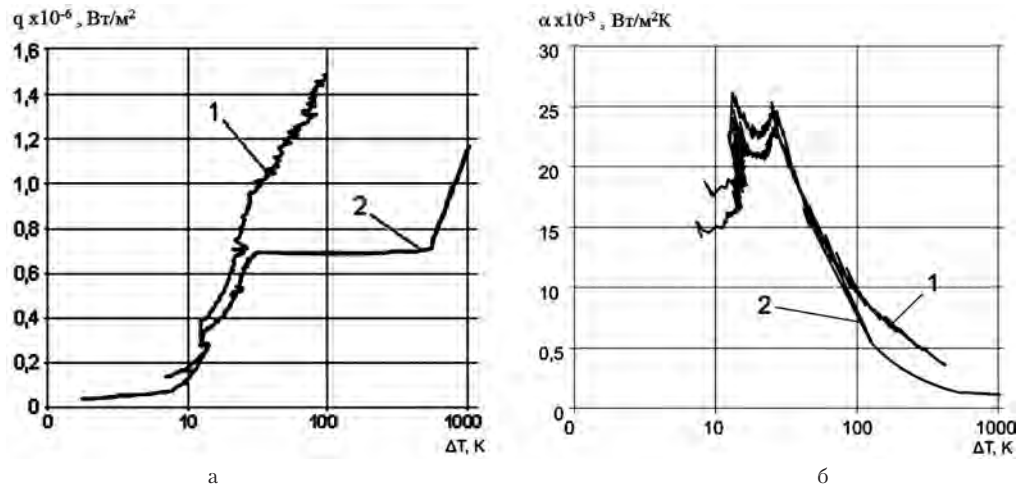


Рис.2. Кривые кипения (а) и коэффициенты теплоотдачи (б) в зависимости от разности температур стенки и кипящей жидкости (ΔT) для наножидкости на основе TiO₂ (1) и дистиллированной воды (2).

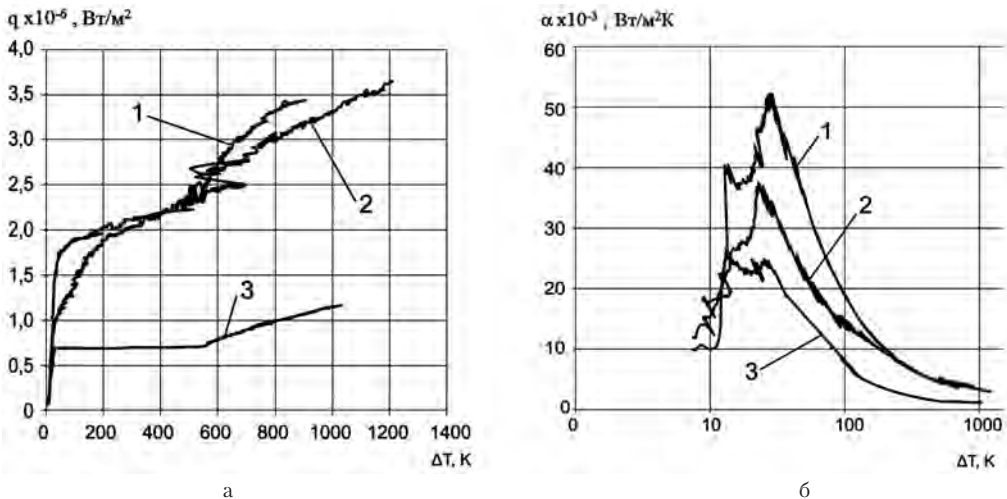


Рис.3. Кривые кипения (а) и коэффициенты теплоотдачи (б) в зависимости от разности температур стенки и кипящей жидкости (ΔT) для наножидкости AlSi-7 с добавлением УНТ (1), AlSi-7 (2) и дистиллированной воды (3).

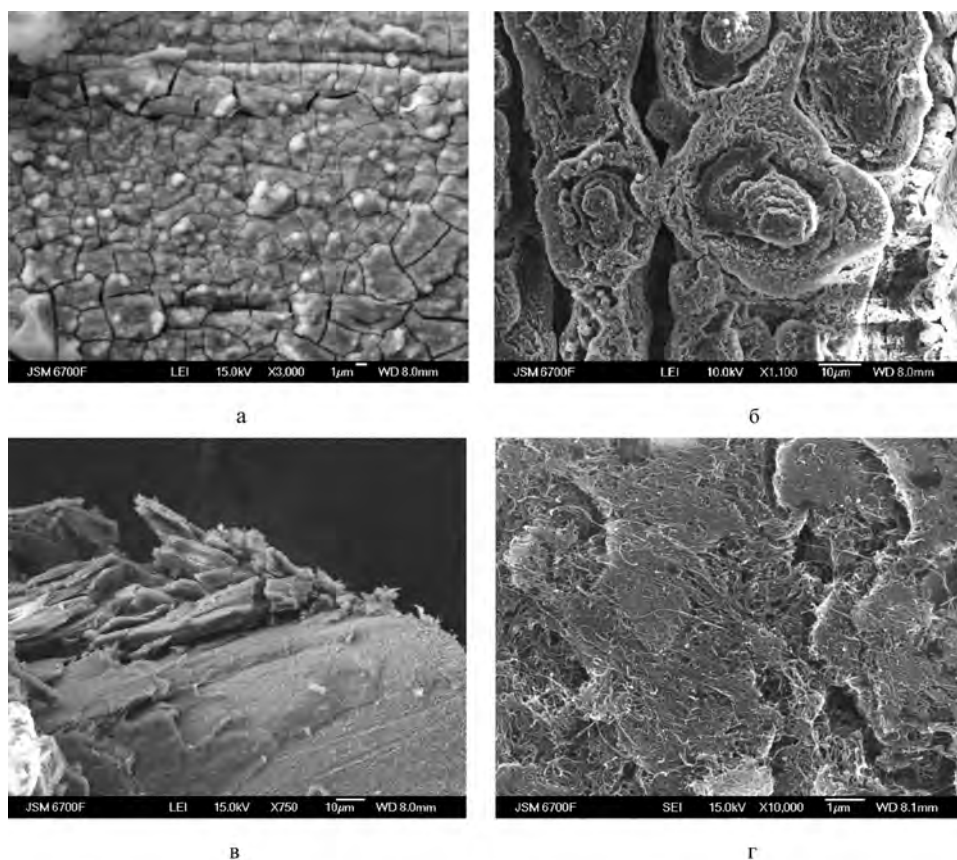


Рис.4. SEM-изображения отложений на поверхности нагрева после кипения водных нанофлюидов на основе гидрослюды (а), TiO_2 (б), природной смеси аттапульгита и монтмориллонита (в) и этой же смеси с добавкой 0,2 % углеродных нанотрубок (г).

Таблица 1. Физико-химические характеристики и максимальные значения КТП и КТО исследованных нанофлюидов

Исследуемая жидкость	d, нм	C, % (об.)	k = l/d	pH	σ , мН/м	ζ , мВ	$q_{кр}, \times 10^{-6},$ Вт/м ²	$\alpha_{макс},$ Вт/(м ² ·К)
Дистиллированная вода	–	0	–	6,0	72,8	–	0,7	25000
AlSi-6	50–400	0,5	10–30	5,4	72,6	–25,7	1,45	25000
TiO_2	70–300	0,5	3–5	6,0	71,8	–39,5	1,55	35000
AlSi-5	100–500	0,5	200–400	5,8	71,5	–18,0	1,65	36000
AlSi-7	50–500	0,5	200–500	5,9	72,6	–19,8	2,42	38000
AlSi-7 + УНТ	70–3000	0,5	500–750	6,5	71,9	–11,5	3,50	52000

Примечание. d – средний размер частиц; C – концентрация частиц; k – средний коэффициент анизотрии частиц; σ – поверхностное натяжение при 20 °С; ζ – электрокинетический потенциал; УНТ – углеродные нанотрубки.

Таблица 2. Адсорбционно-структурные характеристики наноструктурированных отложений на поверхности нагрева после кипения наножидкостей

Отложения	Удельная поверхность, м ² /г	Средний радиус микропор, нм	Объем микропор, см ³ /г
Гидрослюда	85,0	4,2	0,2
Аттапульгит + монтмориллонит (1 : 1)	375	3,0	0,54
Аттапульгит + монтмориллонит (1 : 1) + УНТ (0,2 %)	420	2,3	0,62

сти и шероховатости поверхности способствует увеличению $q_{кр}$ и α [9–11].

Сопоставление максимально достигнутых величин коэффициентов теплоотдачи (рис. 1,б–3,б, табл.1) с характером микрорельефа поверхности нагрева (рис.4) и данными пористой структуры отложенных осадков (табл.2) показывает, что чем выше шероховатость поверхностных отложений и анизометрия формы частиц, тем выше величины $q_{кр}$ и α , характеризующие плотность теплового потока и интенсивность теплообмена (см. табл.1).

Эксперименты показали, что даже если коэффициент анизометрии достаточно велик, но форма частиц плоская, как это характерно для частиц гидрослюда (AlSi-6), то пористость и шероховатость отложений малы и тепловые параметры при кипении такой НЖ тоже невысокие. Действительно, гидрослюда (рис.4,а) из-за пластинчатой формы наночастиц образует на поверхности нагрева плоскостепенный плотно упакованный слой с относительно малой шероховатостью и слабо выраженной пористостью по сравнению с другими анализируемыми осадками НЖ, соответственно и коэффициент теплоотдачи невысокий: $\alpha_{\max} = 25000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис.1,б, табл.1).

Для наножидкости на основе TiO_2 максимальный коэффициент теплоотдачи достигает $35000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис.2,б). Очевидно, это можно объяснить тем, что наночастицы TiO_2 , имея более или менее округлую форму, формируют на поверхности нагрева слой с несколько большей пористостью и шероховатостью (рис.4,б).

Эффект влияния пористости и шероховатости осадка на теплоотдачу особенно отчетливо обнаруживается для двух НЖ: на основе смеси природных алюмосиликатов монтмориллонита и аттапульгита (AlSi-7) и этой же смеси с добавкой углеродных нанотрубок (AlSi-7+УНТ). Как видно из рис.4,в,г и табл.2, пористость и шероховатость поверхностных отложений, образуемых при кипении второй НЖ, содержащей УНТ, выражены заметно сильнее, чем после кипения первой НЖ. При этом значения коэффициентов теплоотдачи α_{\max} для последних двух НЖ (рис.3,б, табл.1) существенно выше аналогичных коэффициентов для гидрослюда и TiO_2 и составляют соответственно 38000 и 52000 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Такое большое числовое значение коэффициентов теплоотдачи этих НЖ и их различие объясняется высокой гидрофильностью алюмосиликатных НЖ, а также различной формой (плоская, игольчатая, ворсистая) и анизометрией НЖ второй смеси,

дающих при кипении наноструктурированные осадки с наиболее развитой поверхностью, пористостью и шероховатостью. Очевидно, что эти три главных фактора обеспечивают максимальную плотность центров парообразования и, как следствие, обуславливают наиболее высокие значения коэффициентов теплоотдачи α_{\max} . Кроме того, введение углеродных нанотрубок, обладающих высокой теплопроводностью, значительно уменьшает термическое сопротивление слоя, способствуя интенсификации теплопередачи при кипении.

Представленные на рис.1,а, 2,а, 3,а кривые кипения позволяют сделать вывод о существенных различиях удельных тепловых потоков для НЖ, образующих при кипении осадки с разной шероховатостью. Так, при одной и той же разнице температур между греющей поверхностью и кипящей жидкостью ($\Delta T = 100 \text{ К}$) удельные тепловые потоки $q_{уд}$ для НЖ с частицами различной анизометрии имели следующие значения, $\text{МВт}/\text{м}^2$: дистиллированная вода – 0,7; гидрослюда – 1,0; TiO_2 – 1,4; AlSi-7 – 1,5; AlSi-7 + УНТ – 1,8. В такой же последовательности, как видно из рис.4 и табл.2, возрастает пористость и шероховатость отложений на поверхности нагревателя.

Таким образом, установлено, что экспериментально полученные величины тепловых параметров при кипении НЖ хорошо коррелируют с пористостью и шероховатостью отложенных наноструктур, зависящих от формы и коэффициента анизометрии НЖ. Из этого следует, что для интенсификации теплообмена целесообразно использование наножидкостей, образующих при кипении наноструктурные отложения с развитой пористостью и шероховатостью.

Выводы

Отложение частиц и формирование наноструктур на поверхности нагрева наблюдается уже в докризисной области пузырькового кипения водных НЖ ($q < 0,7 \text{ МВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$).

Архитектура образующихся наноструктур, то есть их топография, пористость и шероховатость, определяется формой и анизометрией наночастиц. Она остается почти неизменной до температур, отвечающих началу изменений кристаллической структуры НЖ.

Установлено наличие корреляции между пористостью отложенного осадка и тепловыми параметрами: с ростом удельной поверхности и объема пор осадка увеличиваются максимально достижимый удельный тепловой поток и интенсивность теплообмена при кипении НЖ.

Максимальные тепловые параметры при кипении (q и α) зарегистрированы для НЖ на основе смесей НЧ сильно анизометричной формы, формирующих при кипении наноструктуры с наиболее развитой поверхностью, пористостью и шероховатостью. Вероятнее всего, это объясняется наиболее высокой плотностью центров парообразования в этих сформированных поверхностных наноструктурах.

Список литературы

- Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V. et al. Some peculiarities of heat exchange at pool boiling of aluminosilicates-water based nanofluids // Proceedings of the 8th International Symposium on Heat Transfer, Beijing, China, Oct. 21–24, 2012, ISHT8-04-05. — P. 181–190.
- Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko 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. — Vol. 38, № 9. — P. 853–857.
- 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. — Vol. 14, № 2–3. — P. 151–168.
- Kandlikar S.G. A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation // Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME. — 2001. — Vol. 123. — P. 1071–1079.
- Son G., Dhir V.K., Ramanujapu N., Dynamics and Heat Transfer Associated With a Single Bubble During Nucleate Boiling on a Horizontal Surface // Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1999, 121, pp. 623–631.
- Адамсон А. Физическая химия поверхностей. — М.: Мир, 1979. — 568 с.
- Lu Yen-Wen, Kandlikar Satish G., Nanoscale Surface Modification Techniques for Pool Boiling Enhancement : A Critical Review and Future Directions // Heat Transfer Engineering. — 2011. — Vol. 32, № 10. — P. 827–842.
- 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. — 2006. — Vol. 89. — P. 153107–1–3.
- 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.
- 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 // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 2007. — Vol. 50. — P. 4105–4116.
- Theofanus T.G. The boiling crisis phenomenon. Part 2: Dryout dynamics and burnout // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2002. — Vol. 26. — P. 793–810.
- Pham Q.T., Kim T.I., Lee S.S., Chang S.H. Enhancement of critical heat flux using nanofluids for Inessel Retention-External Vessel Cooling // Applied Thermal Engineering. — 2012. — Vol. 35. — P. 157–165.
- 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.
- Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles // Appl. Phys. Letters. — 2001. — Vol. 78. — P. 718–720.
- Kebllinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2002. — Vol. 45. — P. 855–863.
- 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.
- Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2003. — Vol. 46. — P. 851–862.
- Milanova D., Kumar R. Role of Ions in Pool Boiling Heat Transfer of Pure and Silica Nanofluids // Applied Physics Letters. — 2005. — Vol. 87. — P. 233107.
- Bang I.C., Chang S.H. Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃-water Nano-Fluids From a Plain Surface in a Pool // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2005. — Vol. 48. — P. 2407–2419.
- Jo B., Jeon P.S., Yoo J., Kim H. J. Wide Range Parametric Study for the Pool Boiling of Nano-Fluids With a Circular Plate Heater // Journal of Visualization. — 2009. — Vol. 12. — P. 37–46.

Поступила в редакцию 12.02.15

Морару В.Н.¹, канд. техн. наук, **Комиш Д.В.¹**, **Ховавко О.І.¹**, канд. техн. наук, **Снігур О.В.¹**, **Гудков М.М.²**, **Сидоренко М.А.²**

¹**Інститут газу НАН України, Київ**

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

²**Національний технічний університет України «КПІ», Київ**

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

Вплив стану поверхні нагріву на інтенсивність тепловіддачі при кипінні нанорідин

Кипіння рідин широко застосовується у теплообмінному обладнанні, оскільки характеризується інтенсивною тепловіддачею, особливо при використанні нанорідин як теплоносіїв. При цьому на поверхні нагрівання відбувається спонтанне утворення наноструктур різної архітектури, пористості та жорсткості, що створює умови для різкої інтенсифікації теплообміну. З'ясовано зв'язки між інтенсивністю тепловіддачі при кипінні нанорідин та характером наноструктурних відкладень на поверхні нагрівання. Для отримання кривих кипіння та оцінки коефіцієнта тепловіддачі створено експериментальний стенд із автоматичним виміром вхідних і розрахункових параметрів та управлінням проведення експериментів при їх комп'ютерному супроводженні. На основі аналізу експериментального матеріалу (графічні залежності, відеозйомка, порометрія, SEM-зображення) зроблено висновок, що максимальні значення теплових параметрів при кипінні (питомий тепловий потік q та коефіцієнт тепловіддачі α) зареєстровані для нанорідин на основі сумішей наночастинок сильно анізотричної форми. *Бібл. 20, рис. 4, табл. 2.*

Ключові слова: нанорідини, теплообмін, поверхня нагріву, осад.

Moraru V.N.¹, Candidate of Technical Sciences, **Komysh D.V.¹**, **Khovavko A.I.¹**, Candidate of Technical Sciences, **Snigur O.V.¹**, **Gudkov N.N.²**, **Sydorenko N.A.²**

¹**The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev**

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

²**National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Kiev**

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

Influence of Heat Surface Properties on Intensity of Heat Exchange at Nanofluids Boiling

Boiling of liquids is widely used in energetics, because of its high intensity of heat exchange, especially when nanofluids (NF) used as coolants. Such boiling process is accompanied with spontaneous formation of various nanostructures of different architecture, porosity and roughness on heating surface. The purpose of research is estimating correlation between heat transfer intensity of NF boiling and properties of nanostructured deposits on heating surface. Experiments were performed by specially designed and fully automated test unit, equipped with DC power supply and operated by program enabling to control in real time by PC all the parameters of a critical mode including CHF. Experimental data analysis (graphs, charts, SEM images, porosity measurement) shows that maximum heat transfer characteristics of NF boiling (q , α) were registered in the case of NFs with a mixture of NPs of anisometric shape, giving during boiling nanostructures with the most developed surface porosity and roughness. *Bibl. 20, Fig. 4, Table 2.*

Key words: nanofluids, heat exchange, heating surface, sediment.

References

1. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I., Snigur A.V. Some peculiarities of heat exchange at pool boiling of aluminosilicates-water based nanofluids. *Proceedings of the 8th International Symposium on Heat Transfer*, Beijing, China, Oct. 21–24, 2012, ISHT8-04-05, pp.181–190.
2. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko 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. 853–857.
3. 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, 14 (2–3), pp. 151–168.
4. Kandlikar S.G., A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 2001, 123, pp. 1071–1079.
5. Son G., Dhir V.K. and Ramanujapu N., Dynamics and Heat Transfer Associated With a Single Bubble During Nucleate Boiling on a Horizontal Surface, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 1999, 121, pp. 623–631.
6. Adamson A. *Physical Chemistry of Surfaces*. Moscow : Mir, 1979, 568 p. (Rus.)
7. Lu Yen-Wen and Kandlikar Satish G., Nanoscale Surface Modification Techniques for Pool Boiling Enhancement : A Critical Review and Future Directions, *Heat Transfer Engineering*, 2011, 32 (10), pp. 827–842.
8. 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*, 2006, 89, pp. 153107–1–3.
9. 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, 55 (2), pp. 211–216.
10. 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, pp. 4105–4116.
11. Theofanus T.G. The boiling crisis phenomenon. Part 2: Dryout dynamics and burnout, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26, pp. 793–810.
12. Pham Q.T., Kim T.I., Lee S.S., Chang S.H. Enhancement of critical heat flux using nanofluids for In-vessel Retention-External Vessel Cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 35, pp. 157–165.
13. 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, 81 (10), pp. 6692–6699.
14. Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J., Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl. Phys. Letters*, 2001, 78, pp. 718–720.
15. Koblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45, pp. 855–863.
16. 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, 29 (5), pp. 432–460.
17. Das S.K., Putra N., Roetzel W., Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46, pp. 851–862.
18. Milanova, D., and Kumar, R., Role of Ions in Pool Boiling Heat Transfer of Pure and Silica Nanofluids, *Applied Physics Letters*, 2005, 87, pp.233107.
19. Bang I.C., Chang S.H., Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃-water NanoFluids From a Plain Surface in a Pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48, pp. 2407–2419.
20. Jo B., Jeon P.S., Yoo J., Kim H.J., Wide Range Parametric Study for the Pool Boiling of Nano-Fluids With a Circular Plate Heater. *Journal of Visualization*, 2009, 12, pp. 37–46.

Received February 12, 2015