

## Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 502.5:661.21

**Морару В.Н.**, канд. хим. наук*Институт газа НАН Украины, Киев**ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: vasily.moraru@gmail.com*

### Применение наножидкостей для экстренного аварийного охлаждения энергетического оборудования

На основании полученных данных и краткого литературного обзора рассмотрена принципиальная возможность использования наножидкостей для экстренного охлаждения аварийно перегретого энергетического оборудования. С этой целью методом синхронной записи изменения основных параметров теплообмена при кипении воды во времени в условиях постоянной скорости подъема удельной тепловой нагрузки изучена возможность экстренного охлаждения перегретой поверхности теплообмена с помощью наножидкостей в случае возникновения кризиса кипения. Испытанию подвергнуты две наножидкости, полученные на основе природной смеси алюмосиликатов (AlSi-7) и диоксида титана (НЖ-8). Обнаружено, что введение незначительной порции наножидкости в кипящий теплоноситель (дистиллированную воду), находящийся в состоянии пленочного кипения ( $t_{\text{heater}} > 500$  °С), позволяет резко снизить температуру поверхности теплообмена до 130–150 °С, что соответствует переходу к безопасному пузырьковому режиму кипения без снижения удельного теплового потока. При этом весьма важным является тот факт, что данный режим сохраняется достаточно долго при удельной тепловой нагрузке, превышающей значение критического теплового потока для воды, и  $t_{\text{heater}} = 125\text{--}130$  °С. Это позволяет экстренно предотвратить потенциальную аварию (пережог нагревателя и выход из строя теплообменника) и обеспечить бесперебойную работу оборудования. Показано, что охлаждение энергонагруженного оборудования с помощью алюмосиликатных наножидкостей является вполне реальным и экономически выгодным процессом. *Библ. 22, рис. 4, табл. 1.*

**Ключевые слова:** наножидкости, теплообмен, экстренное охлаждение, поверхность нагрева, отложения.

Интенсификация процессов теплообмена — одна из важнейших проблем современной промышленности и энергетики (ядерная техника, ракетостроение, электроника, лазерные излучатели и др.). Во всех машинах, оборудовании и технологиях в этих отраслях возникает потребность интенсивного отведения тепла. Одним из способов решения данной проблемы является

использование в качестве теплоносителей наножидкостей (НЖ), способных работать при высоких удельных тепловых потоках. Целесообразность создания и исследования НЖ объясняется существенным повышением (в 2–3 раза) коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при их кипении по сравнению с базовой жидкостью (водой). Поэтому не слу-

чайно в последние десятилетия значительное внимание в научной литературе уделяется дисперсиям наночастиц в традиционных базовых жидкостях (вода, этиленгликоль (ЭГ)), которые и получили название «наножидкости».

Наножидкости — новый класс теплоносителей, обладающих повышенной теплопроводностью и аномально высокой теплоотдачей при кипении, благодаря чему эти материалы чрезвычайно перспективны для охлаждения высокоэнергетического оборудования (ядерных реакторов, лазеров, электроники и др.). Примечательная особенность НЖ заключается в том, что в процессе их кипения на поверхности нагрева происходит самопроизвольное образование наноструктур различной архитектуры, пористости и шероховатости, построенных из наночастиц (НЧ), что вызывает резкую интенсификацию теплообмена с окружающей средой. Например, удельный тепловой поток (УТП) при кипении водной НЖ может возрасти на 300–400 % по сравнению с обычной водой и достичь величины  $q_{\max} = (3-4) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ , а коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  может превысить 50000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [1–7]. Более того, нами обнаружено, что формирующийся пористый слой на поверхности нагрева способен отодвинуть или избежать феномена кризиса кипения, который чреват пережогом и выходом из строя оборудования [2].

С целью преодоления кризиса теплоотдачи предложены способы и средства турбулизации жидкости за счет закручивания или турбулизирующих вставок, разработаны методы с использованием теплопроводных ребер, капиллярнопористых структур, поверхностей со специальной шероховатостью и др. [8–11]. Как показали наши исследования [1–7], использование НЖ в качестве теплоносителей позволяет проще разрешить эту проблему и резко повысить коэффициент теплоотдачи (КТО), избегая при этом феномена кризиса теплоотдачи и внезапно его наступления.

В настоящее время во всем мире ведутся интенсивные исследования по использованию наножидкостей в энергетике, в частности, для охлаждения силовых трансформаторов, двигателей внутреннего сгорания, охлаждения мощных серверов и т. п. [12–16].

В статье [12] приведен обстоятельный обзор литературы по вопросам применения наножидкостей в автомобильном секторе. Исследования показали, что замена обычных охлаждающих жидкостей на НЖ перспективно для системы охлаждения автомобильного радиатора. Основными факторами, которые препятствуют коммерциализации НЖ, являются недостаточная стабильность НЖ и их высокая се-

бестоимость. После решения этих проблем ожидается, что НЖ будут широко применяться в качестве теплоносителей в теплообменных устройствах.

В работе [13] исследован эффект от добавления 0–1,0 % (об.) наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в базовую жидкость (этиленгликоль + вода) для автомобильного радиатора. С этой целью была разработана экспериментальная установка, на которой изучены эффекты влияния температуры жидкости, скорости потока и объемной доли наночастиц на теплообмен. Результаты показали, что число Нуссельта, общая эффективность и коэффициент теплопередачи возрастают с увеличением объемной доли наночастиц, числа Рейнольдса и массового расхода хладагента, проходящего через радиатор. При добавлении 1 % (об.) частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  эффективность охлаждения радиатора возросла на 40 % по сравнению с исходной базовой жидкостью при постоянном числе Рейнольдса и постоянной скорости массового расхода.

В работе [14] изучена интенсивность конвективного теплообмена при использовании нанофлюида на основе углеродных нанотрубок (УНТ) — вода в автомобильном радиаторе. Экспериментально рассмотрены количественные эффекты таких параметров: метода синтеза и вариации в значениях рН, концентрации наночастиц, числа Нуссельта. Для концентрации наночастиц 1,0 % (об.) и скорости потока охлаждающей жидкости 5 л/мин максимальное повышение теплоотдачи УНТ — нанофлюида на 90,76 % выше по сравнению с водой. Это может быть связано с тем, что углеродные нанотрубки обладают более высокими теплопроводностью, анизотропией и удельной поверхностью  $S_{\text{уд}}$ , а также меньшими термическим сопротивлением и удельным весом по сравнению с водой. Эффективная теплопроводность водных УНТ — хладагентов и число Нуссельта также возрастают с увеличением концентрации наночастиц и скорости потока, что приводит к росту эффективности охлаждения автомобильного радиатора.

В работе [15] проанализирована работа инновационной системы охлаждения для ветряных турбин с использованием НЖ на основе 5 %-й водной дисперсии  $\text{Al}_2\text{O}_3$  как теплоносителя. Доказано, что НЖ из-за их высокого коэффициента конвективной теплопередачи улучшают эффективность системы охлаждения. При стандартных условиях использование НЖ повысило эффективность системы охлаждения максимум до 30 %, в зависимости от скорости потока и концентрации частиц.

Однако из-за сложности и многофакторности нанодисперсных систем до сих пор еще не сформулирован состав наножидкости, который отвечал бы всем техническим требованиям (термостойкость НЖ, высокие коэффициенты теплопереноса, длительное сохранение стабильности и низкая вязкость). На основе системного инженерного подхода к НЖ для передачи тепла в работе [16] сделана попытка выявить основные инженерные параметры НЖ и количественные критерии эффективности охлаждения на основе таковых для однофазных жидкостей. Данный подход включает несколько этапов. Первый — оценка важности теплофизических свойств НЖ для передачи тепла. Поэтому инженерные параметры нанодисперсий рассматриваются в связи с их влиянием на тепловые свойства суспензий наночастиц. Теплопроводность теплоносителя общепризнана как главный фактор, влияющий на эффективность теплопередачи. На втором этапе с помощью системного инженерного подхода обобщены и проанализированы основные физико-химические корреляции, что позволило выявить наиболее влиятельные параметры нанодисперсий. В [16] сделан вывод, что концентрация наночастиц, базовая жидкость, а также размер частиц, по всей видимости, наиболее влиятельные параметры для повышения эффективности теплопередачи в нанодисперсиях.

Тем не менее, предложенный инженерный подход мало что дает для количественной оценки эффективности охлаждения наножидкостями, так что этот вопрос остается по-прежнему актуальным. По нашему мнению, помимо теплопроводности и перечисленных выше показателей, наиболее важными рабочими параметрами НЖ являются анизотропия формы наночастиц и стабильность НЖ к длительному и многократному кипению-охлаждению.

Не умаляя значимости результатов приведенных работ, следует отметить, что важнейшей областью применения наножидкостей все же остается охлаждение ядерных систем, и интерес к этому направлению продолжает нарастать [17–19]. Для атомной энергетики наиболее перспективным может считаться водный теплоноситель, потому что добавки наночастиц позволяют существенно улучшать его теплофизические характеристики. НЖ являются потенциальными хладагентами для IVR-ECCS- и PWRs-реакторов с целью повышения мощности и показателей их безопасности [17]. Благодаря тому, что наножидкости имеют повышенные коэффициент теплопроводности и величину критического теплового потока (КТП), их использование позволяет увеличить DNBR (запас до кризи-

са теплообмена при кипении). Это принципиально важно для проектантов, так как этот показатель нередко служит ограничивающим фактором при выборе параметров теплоносителя.

За последние годы в Институте газа НАН Украины под руководством академика Бондаренко Б.И. разработана серия высокоэффективных НЖ для энергетики и проведены их физико-химические исследования и теплотехнические испытания [1–7, 20]. Новые НЖ обладают повышенными тепловыми параметрами и в то же время устойчивы к воздействию радиации и многократных циклов кипения-охлаждения. Этим требованиям полностью удовлетворяют гидрофильные НЖ на основе природных алюмосиликатов с различной морфологией НЧ. Было установлено, что максимальные значения удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи демонстрируют те НЖ, которые состоят из смесей НЧ анизометричной формы и образуют на кипящей поверхности ажурные наноструктуры с наиболее развитой поверхностью, пористостью и шероховатостью. Вероятнее всего, высокая теплоотдача в этом случае объясняется максимальной плотностью центров парообразования и площадью теплообмена в этих сформированных поверхностных наноструктурах.

На 2017–2018 гг. Институтом газа НАН Украины совместно с одним из предприятий НАЭК «Энергоатом» намечены исследования по выяснению возможности применения НЖ для повышения безопасности работы АЭС. Подобные работы ведутся в США и Южной Корее, всемирно известная французская реакторостроительная фирма «Areva S.A.» с 2008 г. патентует различные способы применения НЖ в охлаждающих контурах ядерных установок. В Евросоюзе начаты исследования по применению НЖ на транспорте, в солнечных установках, в теплонасосах, в химической промышленности (охлаждение реакторов синтеза Фишера-Тропша) и др.

Таким образом, экспериментальное подтверждение принципиальной возможности использования НЖ в энергетике и смежных отраслях является особенно важным для развертывания соответствующих фундаментальных и прикладных исследований по практическому внедрению НЖ, чему и посвящена данная работа.

#### **Объекты и методы исследования**

Представляет интерес, насколько эффективным окажется применение разработанных нами НЖ для экстренного охлаждения перегретой поверхности потенциального реактора в

случае возникновения аварийной ситуации. В отличие от работ [12–17] в нашей работе теплоносителем служила дистиллированная вода (ДВ), а добавки НЖ использовались в качестве охлаждающих жидкостей.

С этой целью нами создана установка с миниатюрным реактором в виде стеклянного цилиндрического сосуда емкостью 350 мл и нагревателем в виде тонкой Ni/Cr проволоки (диаметром 0,31 мм и длиной 143 мм) [3]. На ней были поставлены эксперименты, моделирующие возникновение и экстренное устранение аварийной ситуации, чреватой выходом из строя предполагаемого реактора.

В экспериментальный сосуд набирали 250 мл ДВ и фиксировали его в горизонтальном положении. Осуществляли последовательный подъем тепловой нагрузки до наступления кризиса кипения теплоносителя (ДВ), последующее вырыскивание в реактор порции горячей НЖ в количестве 1/5 общего объема теплоносителя и одновременную запись кривых изменения температуры нагревателя, удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи во времени.

Параллельно с этим записывали кривые кипения дистиллированной воды и двух испытуемых НЖ при постоянной скорости подъема удельной тепловой нагрузки 1,1 кВт/(м<sup>2</sup>·с). Эксперименты проводили на специально разработанном и полностью автоматизированном стенде [3], работающем на постоянном токе и управляемом компьютерной программой. Аналого-цифровой преобразователь и сигнальные нормализаторы также входили в измерительную систему в дополнение к ПК. Нормализаторы обеспечивали преобразование измеряемых сигналов в нормализованные сигналы, которые поступали на вход в аналого-цифровой преобразователь, а также фильтрацию и линеаризацию входных сигналов от датчиков тока и температуры.

Температуру наружной поверхности нагревателя определяли по зависимости электрического сопротивления нихромовой проволоки от температуры [3]. Все измерения электрических и расчетных тепловых параметров (ток, напря-

жение, температура, УТП, КТО и др.) были выполнены с использованием разработанного программного обеспечения. Компьютером одновременно строились графические зависимости между указанными параметрами в режиме онлайн. Погрешность измерения УТП и КТО не превышала 3 %.

В качестве охлаждающей жидкости выбрана наножидкость на основе генетической смеси природных алюмосиликатов украинских месторождений: монтмориллонита и аттапульгита (AlSi-7). Для сравнения была испытана НЖ-8 на основе водной нанодисперсии диоксида титана (TiO<sub>2</sub>) рутильной модификации с более высокой концентрацией НЧ (таблица).

Нанофлюиды получали в результате кратковременного (5 мин) ультразвукового диспергирования на установке УЗДН-2Т соответствующих микропорошков в дистиллированной воде без применения диспергента. Устойчивость исследуемых нанодисперсий, оцененная по величинам их ζ-потенциала и седиментационным методом, была вполне удовлетворительной для измерения тепловых параметров. 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). Некоторые физико-химические и теплотехнические характеристики объектов исследования приведены в таблице.

### Результаты и их обсуждение

На рис.1 приведены совмещенные кривые кипения и соответствующие зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) исследуемых НЖ от разности температур поверхности нагревателя и теплоносителя ( $\Delta T$ ) по сравнению с дистиллированной водой.

Как видно из рис.1, а, кривая кипения для дистиллированной воды (1) имеет характерный вид с горизонтальным участком, который соответствует наступлению кризиса кипения и вне-

### Физико-химические характеристики и величины $q_{\max}$ и $\alpha_{\max}$ при кипении воды и некоторых водных наножидкостей

Наножидкости на основе	$r_{cp}$ , нм	C, % (мас.)	$k = 1/d$	pH	$\sigma$ , мН/м	$\zeta$ , мВ	$q_{\max} \cdot 10^{-6}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\alpha_{\max}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Дистиллированная вода (ДВ)	—	0	—	5,8	72,8	—	1,2	25000
ДВ + TiO <sub>2</sub> (рутил) (НЖ-8)	70–300	0,8	1–5	6,0	71,4	–39,5	1,4	32000
ДВ + монтмориллонит + аттапульгит (AlSi-7)	50–500	0,45	200–500	5,9	72,6	–19,8	3,5	38000

Примечание.  $r_{cp}$  — средний размер наночастиц; C — концентрация наночастиц;  $k$  — коэффициент анизотропии частиц;  $\sigma$  — поверхностное натяжение НЖ при 20 °С;  $\zeta$  — электрокинетический потенциал;  $q_{\max}$  — максимальный удельный тепловой поток;  $\alpha_{\max}$  — максимальный коэффициент теплоотдачи.

запному росту температуры нагревателя при  $q_{cr} = 0,7 \text{ МВт/м}^2$ . Присутствие наночастиц в НЖ не только изменяет характер кривой кипения воды как базовой жидкости, но и вызывает сильный рост УТП ( $q$ ) и коэффициента теплоотдачи ( $\alpha$ ) (рис.1, кривые 2, 3).

Из рис.1 и таблицы следует, что основные тепловые параметры кипения ( $q_{max}$  и  $\alpha_{max}$ ) исследуемых жидкостей увеличиваются в ряду ДВ < НЖ-8 < AlSi-7. Это служит подтверждением того, что теплоотдача при кипении НЖ и, следовательно, их охлаждающая способность гораздо выше, чем у воды [21].

На рис.2 приведена фотография экспериментального сосуда с ДВ, находящейся в состоянии развитого пленочного режима кипения (кризиса), причем в момент, когда разрушение нагревателя еще не произошло. Для выяснения возможности экстренного охлаждения поверхности нагрева оборудования, оказавшегося в подобной аварийной ситуации, мы выбрали именно такое кризисное состояние для введения порции охлаждающей НЖ. Это состояние соответствует

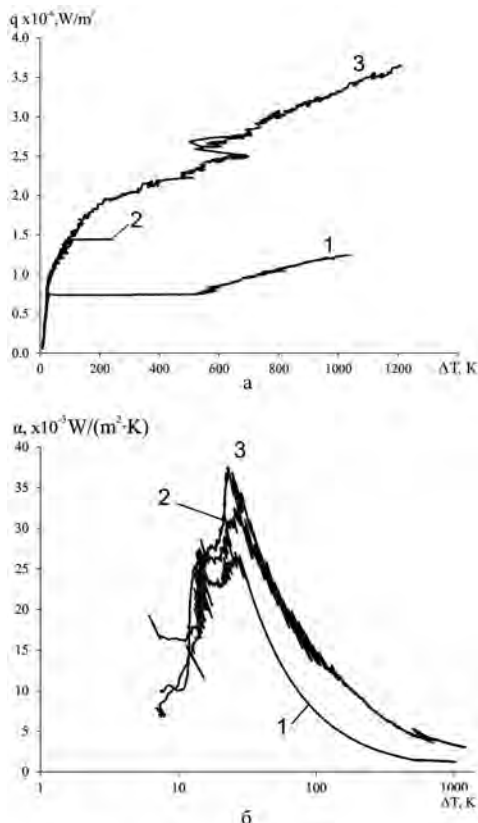


Рис.1. Зависимости удельного теплового потока (а) и коэффициента теплоотдачи (б) при кипении жидкостей: 1 – дистиллированной воды; 2 – НЖ-8 ( $C_{НЖ-8} = 0,8 \text{ \% (мас.)}$ ); 3 – AlSi-7 ( $C_{AlSi7} = 0,45 \text{ \% (мас.)}$ ) – от разности температур нагревателя и теплоносителя  $\Delta T$ .



Рис.2. Кризис кипения дистиллированной воды при  $q_{cr} = 0,7 \text{ МВт/м}^2$ .

участку С–D на кривых синхронной записи тепловых параметров кипения во времени и характеризуется максимальной температурой поверхности нагрева (600–700 °С) и минимальной теплоотдачей  $\alpha_{min}$  при  $q > q_{cr}$  (рис.3).

Сравнительный анализ кривых синхронной записи основных параметров теплообмена во времени при кипении дистиллированной воды и последующем введении охлаждающих НЖ позволил идентифицировать все параметры и режимы теплообмена.

Из рис.3 четко виден выход из кризиса кипения (участок D–E), который достигается добавлением незначительной порции НЖ (1/5 части) к общему рабочему объему теплоносителя. В зависимости от природы и концентрации НЖ, присутствующих в НЖ, а также от их формы и анизотриии происходит частичный или полный выход поверхности теплообмена на докризисный температурный режим. Особенно наглядно сравнение кривых изменения температуры ( $t = f(\tau)$ ) и коэффициента теплоотдачи ( $\alpha = f(\tau)$ ) после введения двух различных НЖ: AlSi-7 и НЖ-8 ( $\text{TiO}_2$ ). Видно, что охлаждение перегретой поверхности теплообмена происходит быстрее и эффективнее в случае применения AlSi-7.

Наиболее примечательно, что введение порции горячей НЖ в кипящий теплоноситель, находящийся в состоянии кризиса, приводит к резкому снижению температуры нагревателя и возвращению к стационарному и безопасному пузырьковому режиму кипения при значении УТП  $q > q_{cr}^{\text{H}_2\text{O}}$ . При этом очень важным является тот факт, что данный режим (участок D–F) сохраняется сколь угодно долго при  $q > q_{cr}$  и  $T = 125\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если с целью экстренного охлаждения вместо НЖ ввести в реактор эквивалентное количество дистиллированной воды, то после незначительного снижения температуры поверхности нагрева система возвращается к пленочному режиму, то есть к кри-

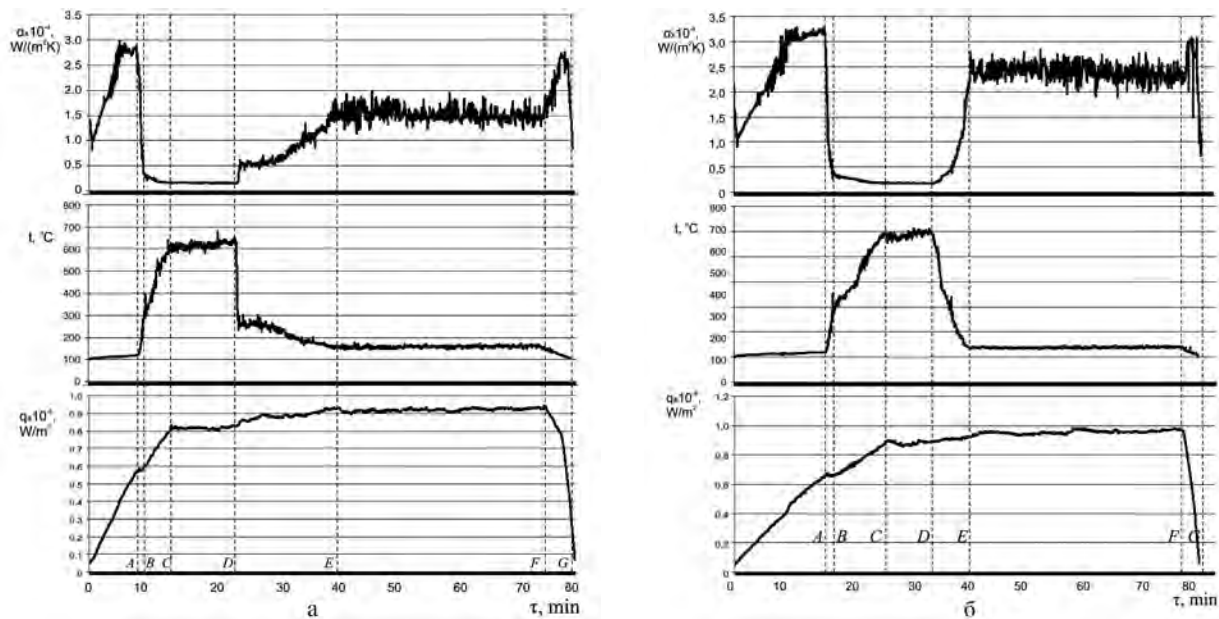


Рис.3. Изменение во времени (t) основных параметров теплообмена при кипении дистиллированной воды и последующем добавлении НЖ-8 (а) и AlSi-7 (б): А – возникновение кризиса кипения первого рода; А-В – короткий переходный режим кипения, при котором происходит стремительный рост температуры поверхности теплообмена без роста тепловой нагрузки; В-С – повышение тепловой нагрузки в пленочном режиме кипения; С-Д – зона теплообмена в пленочном режиме кипения; D – точка добавления НЖ к общему объему теплоносителя (ДВ); D-E – снижение температуры поверхности нагревателя и возвращение к пузырьковому режиму кипения; E-F – стационарный пузырьковый режим кипения при  $q > q_{cr}$ ; F-G – выключение экспериментальной установки.

зису кипения. Это свидетельствует о том, что экстренный выход из кризиса после введения НЖ связан с мгновенным отложением НЧ на поверхности нагрева и с образованием пористого слоя, обуславливающего резкую интенсификацию теплообмена.

На рис.4 для двух разных опытов приведена запись полного хода соответствующих кривых кипения дистиллированной воды классического вида с последующим добавлением в точках С и D охлаждающих НЖ AlSi-7 и НЖ-8 к кипящему теплоносителю. На кривых показано расположение всех реперных точек и проведена интерпретация всех участков кривых, отражающих определенные режимы кипения и изменения тепловых параметров процесса.

Несмотря на внешнее сходство кривых кипения после добавления двух испытуемых НЖ между ними имеются весьма существенные отличия. Совместный анализ кривых на рис.3 и 4 показывает, что после введения НЖ AlSi-7 выход на безопасный пузырьковый режим кипения (участок D-E) происходит не только быстрее и при более высоком значении УТП, но и при меньшей температуре и величине перегрева поверхности  $\Delta T \approx 15-20$  °С, чем в случае применения НЖ-8. Это свидетельствует о большей эффективности охлаждения с помощью AlSi-7.

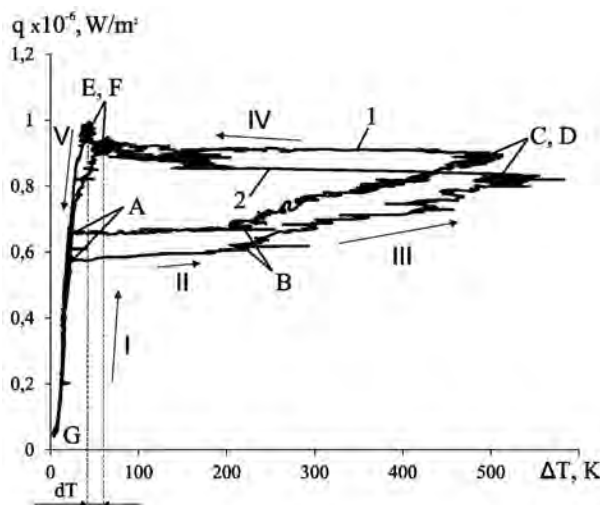


Рис.4. Сравнительное влияние добавления наножидкостей AlSi-7 (1) и НЖ-8 (2) к кипящему теплоносителю в момент развитого пленочного режима на ход кривых кипения теплоносителя (воды). Точки С, D указывают момент введения порции НЖ. На кривых кипения для обеих наножидкостей точки С и D совпадают в одну, как и точки Е, F. Участок I – повышение тепловой нагрузки при пузырьковом режиме кипения; участок II – возникновение и переход к стабильному пленочному режиму (кризису) кипения; участок III – повышение нагрузки уже в пленочном режиме кипения, когда разрушение нагревателя еще не произошло; участок IV – резкое охлаждение поверхности нагревателя после добавления порции наножидкости; участок V – снижение удельной тепловой нагрузки и выключение лабораторной установки.

И это притом, что концентрация AlSi-7 почти вдвое меньше, чем НЖ-8.

Судя по кривым кипения и высоким величинам максимально достигнутых УТП и коэффициента теплоотдачи [7], несравненно больший охлаждающий эффект можно ожидать от применения в качестве теплоносителей композиционных НЖ, содержащих наряду с алюмосиликатами углеродные наночастицы термографенита и углеродных нанотрубок. Это направление исследований сулит большие перспективы и выгоды для практики.

Таким образом, в зависимости от типа добавленной НЖ при возвращении к пузырьковому режиму кипения температура поверхности нагревателя может опускаться до разных значений. Это объясняется принципиально различными «наноархитектурами», возникающими на поверхности нагревательного элемента при кипении разных НЖ [1–7]. В работах [4, 6, 7] было показано, что микрорельеф, пористость и удельная площадь поверхности теплообмена могут изменяться в широких пределах в зависимости от дисперсности, формы и анизотрии отложившихся частиц, что обуславливает различную степень интенсификации теплоотдачи и эффективности охлаждения.

Для приготовления наножидкостей энергетического назначения впервые были предложены природные алюмосиликаты [1–5, 20]. Наноразмерность, разнообразные формы и анизотрия 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.

Как показали исследования [4, 5], преимуществами предлагаемых водно-алюмосиликатных НЖ как теплоносителей являются высокая коллоидная устойчивость и стабильность к многократным циклам кипения-охлаждения, высокие тепловые параметры, доступность и дешевизна, экологическая безопасность. Например, нами было установлено, что после 60-минутного кипения алюмосиликатные НЖ становятся еще более устойчивыми в результате дальнейшего диспергирования НЧ, а другие типы НЖ полностью или частично коагулируют и осаждаются. Эта важная для практики особенность алюмосиликатных НЖ, вероятно, связана со спецификой кристаллохимической структуры минералов и топографии (характера распределения) электрических зарядов на поверхности их частиц, а также с их высокой гидрофильностью [22].

Еще одно немаловажное достоинство алюмосиликатных НЖ заключается в том, что отложившийся при их кипении пористый слой на поверхности теплообмена имеет гелеобразную подвижную структуру, вследствие чего в случае необходимости регенерации может быть легко удален с поверхности сильным потоком базовой жидкости. Подобной обратимостью осадка алюмосиликатные НЖ выгодно отличаются от большинства оксидных, карбидных и других НЖ, образующих твердые отложения на поверхности кипения.

Украина располагает огромными запасами минерального сырья (десятки миллионов тонн), пригодного для получения НЖ. Простой расчет показывает, что промышленное производство и использование НЖ на основе природных алюмосиликатов для охлаждения энергооборудования могут оказаться весьма эффективными и экономически выгодными и стать предметом экспортных поставок. Вышеперечисленные преимущества алюмосиликатных НЖ делают их чрезвычайно перспективными теплоносителями для энергетики.

### Выводы

Рассмотрена принципиальная возможность применения наножидкостей для экстренного охлаждения аварийно перегретого энергетического оборудования в случае внезапного наступления кризиса кипения. С этой целью создана автоматическая установка для синхронной записи основных параметров теплообмена во времени и кривых кипения теплоносителей. На данной установке проведены успешные предварительные испытания двух наножидкостей на основе природной смеси двух алюмосиликатов (AlSi-7) и диоксида титана (НЖ-8), обладающих различной охлаждающей способностью. Установлено, что введение незначительной порции наножидкости в кипящий теплоноситель (дистиллированную воду), находящийся в состоянии пленочного кипения ( $t_{\text{heater}} > 500$  °С), приводит к резкому снижению температуры поверхности теплообмена до 130–150 °С, что позволяет экстренно предотвратить потенциальную аварию. Разработанная методика позволяет количественно оценить сравнительную охлаждающую способность различных наножидкостей.

Получено убедительное доказательство того, что повышенные теплоотдача и охлаждающая способность при кипении наножидкостей по сравнению с водой связаны с изменением природы и микрорельефа поверхности нагрева вследствие отложения слоя наночастиц, поддерживающего устойчивый пузырьковый режим кипения.

Доказана перспективность исследуемых водно-алюмосиликатных наножидкостей как теплоносителей для энергетики вследствие их высоких тепловых параметров, их стабильности к воздействию радиации и многократным циклам кипения-охлаждения, доступности и экологической безопасности.

### 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., et al. Nanofluids for Power Engineering : 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., et al. 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.
- Бондаренко Б.И., Морару В.Н., Сидоренко С.В. и др. Исследования по созданию наножидкостей для энергетики // Экология и промышленность. — 2013. — № 3. — С. 51–55.
- Морару В.Н., Комыш Д.В., Ховавко А.И. и др. Наножидкости на основе украинских природных алюмосиликатов — перспективные теплоносители для энергетики // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 1. — С. 22–32.
- Морару В.Н., Комыш Д.В., Ховавко А.И. и др. Влияние состояния поверхности нагрева на интенсивность теплоотдачи при кипении наножидкостей // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 2. — С. 25–33.
- Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., et al. Nanostructured Architectures on the Heater Surface at Nanofluids Boiling and Their Role in the Intensification of Heat Transfer // Nanoscience and Nanoengineering. — 2016. — Vol. 4, № 1. — P. 12–22.
- Kandlikar S.G. A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation // J. Heat Transfer-Transactions ASME. — 2001. — Vol. 123. — P. 1071–1079.
- Pat. 2433949 RU, Int.Cl. B 82 B 3/00 (2006.01), B 82 Y 40/00 (2011.01). Method to form nanorelief on heat-exchange surfaces of products, Ju.A.Kuzma-Kichta, A.V.Lavrikov, N.Ja.Parshin, V.N.Turchin, D.N.Ignat'ev, Ju.P.Shtefanov, Publ. 20.11.2011, Bull. 32.
- Lu Yen-Wen, Kandlikar S.G. Nanoscale Surface Modification Techniques for Pool Boiling Enhancement — A Critical Review and Future Directions // Heat Transfer Engineering. — 2011. — Vol. 32. — P. 827–842.
- Furberg R. Enhanced Boiling Heat Transfer on a Dendritic and Micro-Porous Copper Structure : Doctoral Thesis by Richard Furberg, KTH School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology, Stockholm, Nov. 2011, 86 p., ISBN 978–91–7501–163–9.
- Bhogare R.A., Kothawale B.S. A Review on applications and challenges of Nanofluids as coolant in Automobile Radiator // International Journal of Scientific and Research Publications. — 2013. — Vol. 3, Iss. 8 — P. 1–11. — ISSN 2250–3153.
- Bhogare R.A., Kothawale B.S. Performance investigation of Automobile Radiator operated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nanofluid // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). — 2014. — Vol. 11, Iss. 3, Ver. V. — P. 23–30. — e-ISSN: 2278–1684, p-ISSN: 2320–334X.
- Chougule S.S., Sahu S.K. Thermal Performance of Automobile Radiator Using Carbon Nanotube-Water Nanofluid Experimental Study // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. — 2014. — Vol. 6. — 041009-1.
- Risi de A., Milanese M., Colangelo G., Laforgia D. High Efficiency Nanofluid Cooling System for Wind Turbines // Thermal Science. — 2014. — Vol. 18, № 2. — P. 543–554.
- Timofeeva E.V. Nanofluids for Heat Transfer — Potential and Engineering Strategies // Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, Dr. Amimul Ahsan (Ed.), In Tech Rijeka, Croatia, 2011, pp. 435–450. — ISBN: 978–953–307–584–6.
- Pham Q.T., Kim T.I., Lee S.S., Chang S.H. Enhancement of critical heat flux using nano-fluids for Invesel Retention-External Vessel Cooling // Applied Thermal Engineering. — 2012. — Vol. 35. — P. 157–165.
- US Patent 2008/0212733 A1 (376/282) — Nuclear power plant using nanoparticles in emergency systems and related method. — Filed on March 2, 2007. Published on September 4, 2008.
- US Patent 2008/0219396 A1 (376/282) — Nuclear power plant using nanoparticles in closed circuits emergency systems and related method. — Filed on March 2, 2007. Published on September 11, 2008.
- Пат. 100592 Укр., МПК (2013.01) С 09 К 5/00; В 82 В 1/00, 3/00; В 82 Y 30/00. Теплоносії на основі водної суспензії наночастинок / Б.І.Бондаренко, В.Н.Морару, С.В.Сидоренко і др. — Опубл. 10.01.13, Бюл. № 1.
- Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sidorenko S.V., Komysch D.V. Nanofluids for Power Engineering: Emergency Cooling of Overheated Heat Transfer Surfaces // Technical Physics Letters. — 2016. — Vol. 42, № 7. — P. 675–679.
- Тарасевич Ю.И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. — Киев : Наук. думка, 1988. — 248 с.

Поступила в редакцию 21.10.16



**Морару В.Н.**, канд. хім. наук

**Інститут газу НАН України, Київ**

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

## **Застосування нанорідин для екстреного аварійного охолодження енергетичного обладнання**

На підставі отриманих даних та короткого літературного огляду розглянуто принципову можливість використання нанорідин для екстреного охолодження аварійно перегрітого енергетичного устаткування. З цією метою методом синхронного запису зміни основних параметрів теплообміну при кипінні води у часі в умовах постійної швидкості підвищення питомого теплового навантаження вивчено можливість екстреного охолодження перегрітої поверхні теплообміну за допомогою нанорідин у разі виникнення кризи кипіння. Випробуванню піддані дві нанорідини, отримані на основі природної суміші алюмосилікатів (AlSi-7) та діоксиду титану (НЖ-8). Виявлено, що введення незначною порції нанорідини у киплячий теплоносіє (дистильовану воду), що знаходиться у стані плівкового кипіння ( $t_{\text{heater}} > 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ), дає змогу різко знизити температуру поверхні теплообміну до  $130\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$ , що відповідає переходу до безпечного бульбашкового режиму кипіння без зниження питомого теплового потоку. При цьому дуже важливим є той факт, що даний режим зберігається досить довго при питомому тепловому навантаженні, що перевищує значення критичного теплового потоку для води, та  $t_{\text{heater}} = 125\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$ . Це дає змогу негайно запобігти потенційній аварії (перепал нагрівача та вихід з ладу теплообмінника) та забезпечити безперебійну роботу обладнання. Показано, що охолодження енергонагруженого обладнання за допомогою алюмосилікатних нанорідин є цілком реальним та економічно вигідним процесом. *Бібл. 22, рис. 4, табл. 1.*

**Ключові слова:** нанорідини, теплообмін, екстрене охолодження, поверхня нагріву, відкладення.

**Moraru V.N.**, Candidate of Chemical Sciences

**The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev**

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

## **Nanofluids Applying for Emergency Cooling of High Loaded Equipment**

Based on these data and a brief literature review we have examined the principled possibility of using nanofluids for emergency cooling of high-energy equipment. With that end in view, the possibility of emergency cooling of an overheated heat transfer surface using nanofluids in the case of a boiling crisis is explored by means of synchronous recording of changes of main heat transfer parameters of boiling water over time. Two nanofluids are tested, which are derived from a mixture of natural aluminosilicates (AlSi-7) and titanium dioxide (NF-8). It is found that the introduction of a small portions of nanofluid into a boiling coolant (distilled water) in a state of film boiling ( $t_{\text{heater}} > 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) can dramatically decrease the heat transfer surface temperature to  $130\text{--}150 \text{ }^\circ\text{C}$ , which corresponds to a transition to a safe nucleate boiling regime without affecting the specific heat flux. The fact that this regime is kept for a long time at a specific heat load exceeding the critical heat flux for water and  $t_{\text{heater}} = 125\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$  is particularly important. This makes it possible to prevent a potential accident emergency (heater burnout and failure of the heat exchanger) and to ensure the smooth operation of the equipment. It is shown that cooling of energyloaded equipment by using aluminosilicate NFs is quite realistic and cost-effective process. *Bibl. 22, Fig. 4, Tab. 1.*

**Key words:** nanofluids, heat exchange, emergency cooling, heating surface, deposits.

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 8<sup>th</sup> International Symposium on Heat Transfer*, Beijing, China, Oct. 21–24, 2012, pp. 181–190, ISHT8-04-05.
2. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I. Nanofluids for Power Engineering : 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. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sidorenko S.V., Svjatenko A.M., Kozhan A.P., Hovavko A.I., Komysh D.V., Snigur A.V., Volkov N.V. Issledovanija po sozdaniju nanozhidkosteij dlja jenergetiki, *Jekologija i promyshlennost'*, 2013, (3), pp. 51–55.
5. Moraru V.N., Komysh D.V., Hovavko A.I., Snigur A.V., Gudkov N.N., Sidorenko N.A., Marinin A.I. Nanozhidkosti na osnove ukrainskikh prirodnyh aljumsilikatov – perspektivnyje teplonositeli dlja jenergetiki, *Jenergotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (1), pp. 22–32. (Rus.)
6. Moraru V.N., Komysh D.V., Hovavko A.I., Snigur A.V., Gudkov N.N., Sidorenko N.A. Vlijanie sostojanija poverhnosti nagreva na intensivnost' teplootdachi pri kipenii nanozhidkosteij, *Jenergotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (2), pp. 25–33. (Rus.)
7. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I. Nanostructured Architectures on the Heater Surface at Nanofluids Boiling and Their Role in the Intensification of Heat Transfer, *Nanoscience and Nanoengineering*, 2016, 4 (1), pp. 12–22.
8. Kandlikar S.G. A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation, *J. Heat Transfer-Transactions ASME*, 2001, 123, pp. 1071–1079.
9. Patent RU 2433949, Int.Cl. B 82 B 3/00 (2006.01), B 82 Y 40/00 (2011.01). Method to form nanorelief on heat-exchange surfaces of products, Ju.A.Kuzma-Kichta, A.V.Lavrikov, N.Ja.Parshin, V.N.Turchin, D.N.Ignat'ev, Ju.P.Shtefanov, Publ. 20.11.2011, Bull. 32.
10. Lu Yen-Wen, Kandlikar S.G. Nanoscale Surface Modification Techniques for Pool Boiling Enhancement – A Critical Review and Future Directions, *Heat Transfer Engineering*, 2011, 32, pp. 827–842.
11. Richard Furberg. Enhanced Boiling Heat Transfer on a Dendritic and Micro-Porous Copper Structure, *Doctoral Thesis by Richard Furberg*, KTH School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology, Stockholm, Nov. 2011, 86 p., ISBN 978-91-7501-163-9.
12. Rahul A. Bhogare, B.S.Kothawale. A Review on applications and challenges of Nano-fluids as coolant in Automobile Radiator, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2013, 3 (8), pp. 1–11, ISSN 2250–3153.
13. Rahul A. Bhogare, B.S.Kothawale. Performance investigation of Automobile Radiator operated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nanofluid, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 2014, 11, Iss. 3, Ver. V, pp. 23–30, e-ISSN: 2278–1684, p-ISSN: 2320–334X,
14. Sandesh S. Chougule, S.K.Sahu, Thermal Performance of Automobile Radiator Using Carbon Nanotube-Water Nanofluid Experimental Study, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2014, 6, pp. 041009-1.
15. Arturo de Risi, Marco Milanese, Gianpiero Colangelo and Domenico Laforgia, High Efficiency Nanofluid Cooling System for Wind Turbines, *Thermal Science*, 2014, 18 (2), pp. 543–554.
16. Timofeeva Elena V. Nanofluids for Heat Transfer – Potential and Engineering Strategies. In: Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, Dr. Amimul Ahsan (Ed.), InTech Rijeka, Croatia, 2011, pp. 435–450, ISBN: 978–953–307–584–6.
17. 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, 35, pp. 157–165.
18. US Patent 2008/0212733 A1 (376/282) – Nuclear power plant using nanoparticles in emergency systems and related method. – Filed on March 2, 2007. Published on September 4, 2008.
19. US Patent 2008/0219396 A1 (376/282) – Nuclear power plant using nanoparticles in closed circuits emergency systems and related method. – Filed on March 2, 2007. Published on September 11, 2008.
20. Pat. 100592 Ukr., MPK (2013.01) C 09 K 5/00; B 82 B 1/00, 3/00; B 82 Y 30/00. Teplonosij na osnovi vodnoї suspenzii nanochastinok, B.I.Bondarenko, V.N.Moraru., S.V.Cidorenko, V.M.Dmitriev, O.I.Hovavko, D.V.Komish, Publ. 10.01.2013, Bull. 1. (Ukr.)
21. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sidorenko S.V., Komysh D.V. Nanofluids for Power Engineering: Emergency Cooling of Overheated Heat Transfer Surfaces, *Technical Physics Letters*, 2016, 42 (7), pp. 675–679.
22. Tarasevich Yu.I. [The structure and surface chemistry of layered silicates], Kiev : Naukova Dumka, 1988, 248 p. (Rus.)