

03

Наножидкости для энергетики: экстренное охлаждение перегретых поверхностей теплообмена

© Б.И. Бондаренко, В.Н. Морару, С.В. Сидоренко, Д.В. Комыш

Институт газа НАН Украины, 03113 Киев, Украина
E-mail: vasily.moraru@gmail.com

Поступило в Редакцию 4 января 2016 г.

Путем синхронной записи изменения основных параметров теплообмена при кипении воды во времени 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 ($t_{heater} > 500^\circ\text{C}$), позволяет резко снизить температуру поверхности теплообмена до уровня $130\text{--}150^\circ\text{C}$, что соответствует переходу к безопасному пузырьковому режиму кипения без снижения удельного теплового потока. При этом архиважным является тот факт, что данный режим сохраняется достаточно долго при удельной тепловой нагрузке, превышающей значение критического теплового потока для воды и $t_{heater} = 125\text{--}130^\circ\text{C}$. Это позволяет экстренно предотвратить потенциальную аварию (пережог нагревателя и выход из строя теплообменника) и обеспечить бесперебойную работу оборудования.

Создание новых материалов и процессов для обеспечения безопасного функционирования энергетического оборудования является актуальной задачей современности.

Наножидкости (НЖ) — новый класс теплоносителей, обладающих повышенной теплопроводностью и теплоотдачей при кипении, благодаря чему эти материалы чрезвычайно перспективны для охлаждения высокоэнергетического оборудования (например, 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. Например, критический тепловой поток (КТП) при кипении водной НЖ может возрасти на 300–400% по сравнению с обычной водой и достичь величины $q_{cr} = 3-4 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$, а коэффициент теплоотдачи (α) может превысить $50\,000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ [1–4]. Более того, нами [2] обнаружено, что формирующийся пористый слой на поверхности нагрева способен отодвинуть кризис кипения, чреватый пережогом и выходом из строя оборудования.

С целью интенсификации теплообмена и избегания наступления кризиса кипения предложены различные способы турбулизации потоков теплоносителя, разработаны методы создания искусственной шероховатости поверхности нагрева с использованием турбулизующих вставок, капиллярно-пористых структур и т. д. [5–8]. В то же время, как показали наши исследования [1–3], использование НЖ в качестве теплоносителей позволяет проще решить эту проблему и резко повысить коэффициент теплоотдачи (КТО), избегая при этом феномена кризиса кипения и внезапности его наступления.

Исследования последнего десятилетия показали, что применение НЖ позволяет значительно повысить величину максимально достижимого удельного теплового потока (q_{max}) и интенсивность теплоотдачи при кипении по сравнению с базовыми жидкостями (вода, этиленгликоль и др.) [1–8]. Это делает весьма перспективным использование НЖ в качестве хладагентов в системах безопасности важных научных и промышленных объектов, о чем свидетельствуют многочисленные опубликованные данные [9–12].

Представляет интерес вопрос, насколько эффективным окажется применение разработанных нами НЖ для экстренного охлаждения перегретой поверхности потенциального реактора в случае возникновения аварийной ситуации. В отличие от процитированных работ [9–12], в нашей работе теплоносителем служила дистиллированная вода (ДВ), а добавки НЖ использовались в качестве охлаждающих жидкостей.

С этой целью нами [3] создана установка с миниатюрным реактором в виде стеклянного цилиндрического сосуда емкостью 350 ml и нагревателем в виде тонкой проволоки Ni/Cr (диаметром 0.31 mm и длиной 143 mm), на которой поставлены эксперименты, моделирующие возникновение и экстренное устранение аварийной ситуации, чреватой выходом из строя предполагаемого реактора. В экспериментальный

сосуд набирали 250 ml ДВ и фиксировали его в горизонтальном положении. Опыты осуществляли путем последовательного подъема тепловой нагрузки до наступления кризиса кипения теплоносителя (дистиллированная вода), последующего впрыскивания в реактор порции горячей НЖ в количестве 1/5 общего объема теплоносителя и одновременной записи кривых изменения температуры нагревателя, удельного теплового потока (УТП) и коэффициента теплоотдачи во времени.

Параллельно с этим записывали кривые кипения дистиллированной воды и двух испытуемых НЖ при постоянной скорости подъема удельной тепловой нагрузки ($1.1 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). 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 как преобразование измеряемых сигналов в нормализованные сигналы, которые поступали на вход в аналого-цифровой преобразователь, так и 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, напряжение, температура, КТП, 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 была выбрана НЖ на основе генетической смеси природных алюмосиликатов украинских месторождений — монтмориллонита и аттапульгита (AlSi-7). Для сравнения испытана НЖ-8 на основе водной нанодисперсии диоксида титана (TiO_2) рутильной модификации с более высокой концентрацией НЧ (см. таблицу). Нанофлюиды получали путем кратковременного (5 min) 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

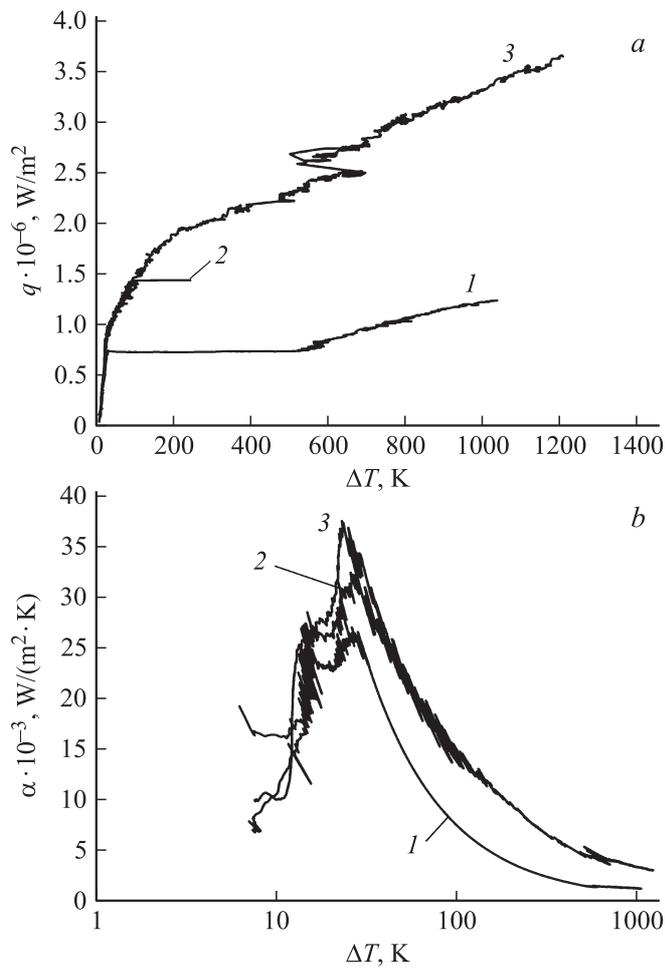


Рис. 1. Зависимости удельного теплового потока (a) и коэффициента теплоотдачи (b) при кипении дистиллированной воды (1) и наножидкостей на основе диоксида титана (2) и генетической смеси монтмориллонита и аттапульгита (3) от разности температур нагревателя и теплоносителя (ΔT).

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

Основа изученных жидкостей	Средний размер частиц, nm	Концентрация частиц, mass %	Коэффициент анизотропии частиц $1/d$	pH	Поверхностное натяжение при 20°С σ , mN/m	Электрокинетический потенциал ξ mV	$q_{\max} \cdot 10^{-6}$, W/m ²	α_{\max} , W/(m ² · К)
Дистиллированная вода	–	0	–	6.0	72.8	–	0.7	25000
TiO ₂ (рутил) (НЖ-8)	70–300	0.8	1–5	6.0	71.4	–39.5	1.4	32000
Монтмориллонит + аттапульгит (AlSi-7)	50–500	0.45	200–500	5.9	72.6	–19.8	3.5	38000

и ξ -потенциал НЖ определяли с помощью лазерного корреляционного спектрометра ZetaSizer NANO-ZS (Malvern Instrument, UK), а поверхностное натяжение — методом пластинки Вильгельми (модифицированный тензиометр K6 KRÜSS GmbH, Germany). Некоторые физико-химические характеристики объектов исследования приведены в таблице.

На рис. 1, *a, b* приведены совмещенные кривые кипения и соответствующие зависимости коэффициента теплоотдачи α ($W/(m^2 \cdot K)$) исследуемых НЖ от разности температур поверхности нагревателя и теплоносителя (ΔT) по сравнению с дистиллированной водой.

Как видно из рис. 1, *a*, кривая кипения для дистиллированной воды (*I*) имеет характерный вид с горизонтальным участком, который соответствует наступлению кризиса кипения и внезапному росту температуры нагревателя при $q_{cr} = 0.7 MW/m^2$. Присутствие наночастиц в НЖ не только изменяет характер кривой кипения воды как базовой жидкости, но и вызывает сильный рост УТП (q) и коэффициента теплоотдачи (α) (рис. 1, кривые 2, 3). Из рис. 1 и таблицы следует, что основные тепловые параметры кипения (q_{max} и α_{max}) исследуемых жидкостей увеличиваются в ряду ДВ<НЖ-8<AlSi-7. Это служит подтверждением того, что теплоотдача при кипении НЖ, а следовательно, и их охлаждающая способность гораздо выше, чем у воды.

На рис. 2 приведена фотография экспериментального сосуда с дистиллированной водой, 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, нами выбрано именно такое кризисное состояние для введения порции охлаждающей НЖ. Это состояние соответствует участку *CD* на кривых синхронной записи тепловых параметров кипения во времени и характеризуется максимальной температурой поверхности нагрева ($600-700^\circ C$) и минимальной теплоотдачей (α_{min}) при $q > q_{cr}$ (рис. 3, *a, b*).

Сравнительный анализ кривых синхронной записи основных параметров теплообмена во времени при кипении дистиллированной воды и последующем введении охлаждающих НЖ (рис. 3, *a, b*) позволил идентифицировать все параметры и режимы теплообмена. Из рисунка четко виден выход из кризиса кипения (участок *D-E*), который достигается добавлением незначительной порции НЖ (1/5 части) к

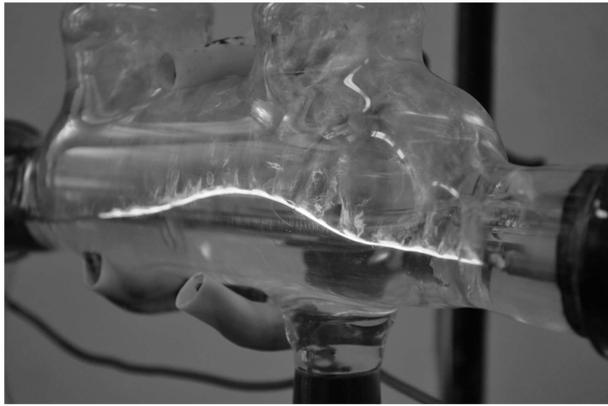


Рис. 2. Кризис кипения дистиллированной воды (при $q_{cr} = 0.7 \text{ MW/m}^2$).

общему рабочему объему теплоносителя. В зависимости от природы и концентрации НЧ, присутствующих в НЖ, а также от их формы и анизотропии 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 (TiO_2) (рис. 3, *a, b*), откуда следует, что охлаждение перегретой поверхности теплообмена происходит быстрее и эффективнее в случае применения AlSi-7.

Наиболее примечательным моментом является то, 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 архиважным является тот факт, что данный режим (участок $D-F$) сохраняется сколь угодно долго при $q > q_{cr}$ и $T = 125-130^\circ\text{C}$. Если же с целью экстренного охлаждения вместо НЖ ввести в реактор эквивалентное количество дистиллированной воды, то после незначительного снижения температуры поверхности нагрева система тотчас возвращается к пленочному режиму, т.е. к кризису кипения. Это свидетельствует о том, что экстренный выход из кризиса после введения НЖ связан с мгновенным

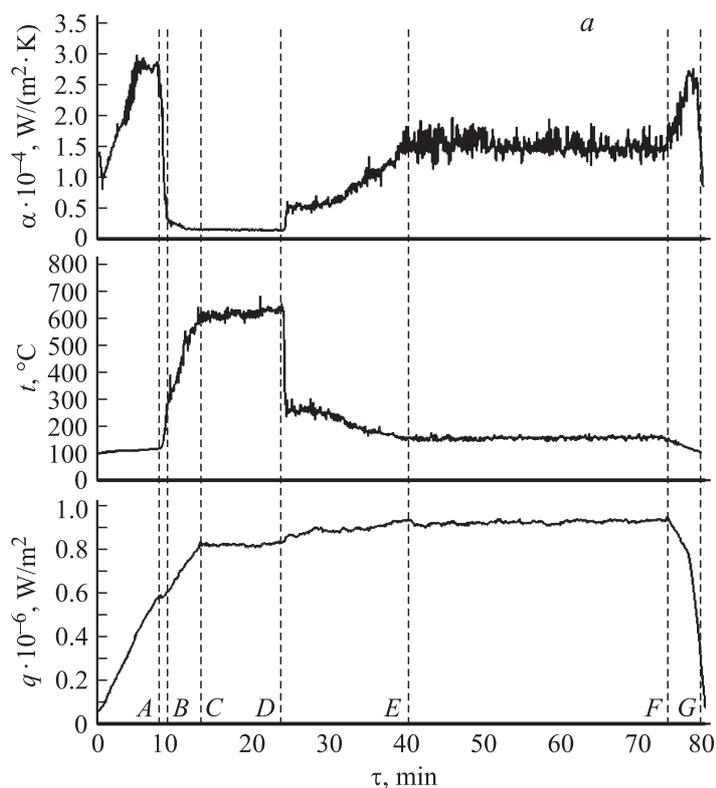


Рис. 3. Изменение во времени (τ) основных параметров теплообмена при кипении дистиллированной воды с последующим добавлением наножидкостей НЖ-8 (*a*) и AlSi-7 (*b*). *A* — возникновение кризиса кипения первого рода; *A–B* — короткий переходный режим кипения, при котором происходит стремительный рост температуры поверхности теплообмена без роста тепловой нагрузки; *B–C* — повышение температуры нагревателя и тепловой нагрузки в пленочном режиме кипения; *C–D* — зона теплообмена в пленочном режиме кипения; *D* — точка добавления НЖ к общему объему теплоносителя (дистиллированной воды); *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.

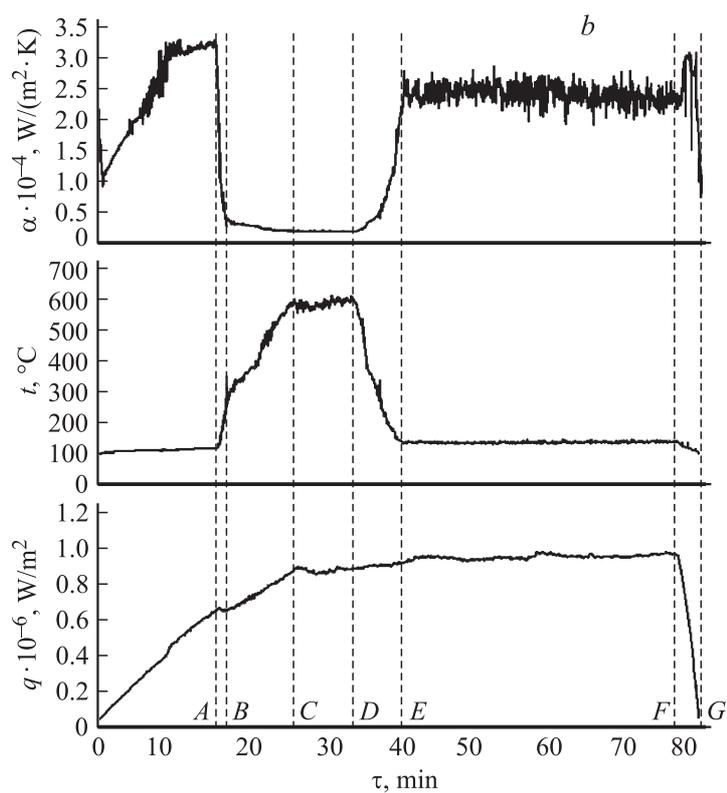


Рис. 3 (продолжение).

отложением НЧ на поверхности нагрева и 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 *C* 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.

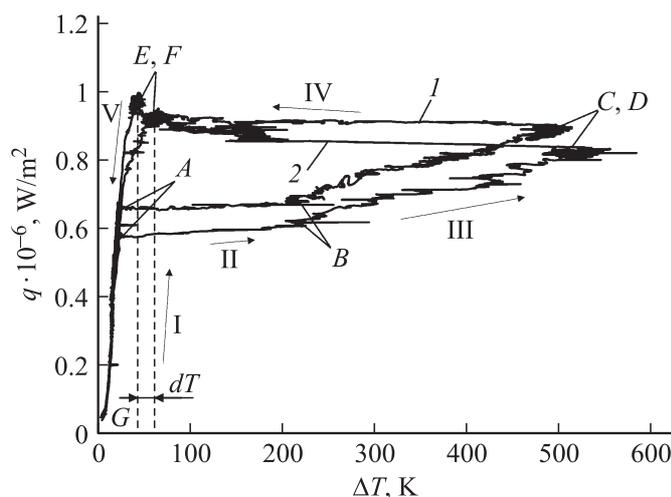


Рис. 4. Сравнительное влияние добавления наножидкостей AlSi-7 (1) и NJ-8 (2) к кипящему теплоносителю в момент развитого пленочного режима на ход кривых кипения теплоносителя (воды). Точки *C, D* указывают момент введения порции НЖ. На кривых кипения для обеих наножидкостей точки *C* и *D* совпадают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

Несмотря на внешнее сходство кривых кипения после добавления двух испытуемых НЖ, между ними имеются весьма существенные отличия. Совместный анализ кривых на рис. 3, *a, b* и рис. 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 $\Delta T \approx 15–20^\circ\text{C}$, чем в случае применения НЖ-8. Это свидетельствует о большей эффективности охлаждения

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

Таким образом, в зависимости от типа добавленной НЖ, при возвращении к пузырьковому режиму кипения температура поверхности нагревателя может опускаться до различных значений. Это объясняется принципиально различными „наноархитектурами“, возникающими на поверхности нагревательного элемента при кипении разных НЖ [1–4]. Ранее нами [13] было показано, что микрорельеф, пористость и удельная площадь поверхности теплообмена могут изменяться в широких пределах в зависимости от дисперсности, формы и анизотрии отложившихся частиц. Очевидно, что именно с этими факторами связана различная степень повышения теплоотдачи и эффективности охлаждения при использовании различных по природе наножидкостей.

Работа выполнена в рамках инновационного проекта ДАНИИ України № ДЗ/458-2013.

Список литературы

- [1] *Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysch D.V., Khovavko A.I., Snigur A.V.* // ISHT-8'2012: Proceedings of the 8th International Symposium on Heat Transfer. October 21–24, 2012. Beijing, China, ISHT8-04-05. 2012. P. 181–190.
- [2] *Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysch D.V., Khovavko A.I.* // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38(9). P. 853–857.
- [3] *Bondarenko B.I., Moraru V.N., Iliencko B.K., Khovavko A.I., Komysch D.V., Panov E.M., Sydorenko S.V., Snigur O.V.* // Int. J. Energy Clean Environ. 2013. V. 14 (2–3). P. 151–168.
- [4] *Морару В.Н., Ховавко А.И., Комыш Д.В., Снигур А.В., Гудков Н.Н., Сидоренко Н.А.* // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2015. № 1. С. 22–32.
- [5] *Kandlikar S.G.* // J. Heat Transfer—Transactions ASME. 2001. V. 123. P. 1071–1079.
- [6] *Kuzma-Kichta Ju.A., Lavrikov A.V., Parshin N.Ja., Turchin V.N., Ignat'ev D.N., Shtefanov Ju.P.* // Patent RU 2433949. Int. Cl. B82B 3/00 (2006.01), B82Y 40/00 (2011.01); Method to form nanorelief on heat-exchange surfaces of products. 20.11.2011. Bull. 32.
- [7] *Lu Yen-Wen, Kandlikar Satish G.* // Heat Transfer Eng. 2011. V. 32. P. 827–842.

- [8] *Richard Furberg*. // Doctoral Thesis by Richard Furberg, KTH School of Industrial Engineering and Management Department of Energy Technology. Stockholm, November 2011. 86 p. ISBN 978-91-7501-163-9.
- [9] *Arturo de Risi, Marco Milanese, Gianpiero Colangelo, Domenico Laforgia*. // *Therm. Sci.* 2014. V. 18(2). P. 543–554.
- [10] *Rahul A. Bhogare, Kothawale B.S.* // *Int. J. Scientific Res. Publ.* 2013. V. 3(8). P. 1–11. ISSN 2250–3153.
- [11] *Rahul A. Bhogare, Kothawale B.S.* // *IOSR J. Mech. Civil Eng. (IOSR-JMCE)*. 2014. V. 11(3). Ver. V. P. 23–30.
- [12] *Sandesh S. Chougule, Sahu S.K.* // *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 2014. V. 6. P. 041 009–1.
- [13] *Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysch D.V., Khovavko A.I.* // *Nanosci. Nanoeng.* 2016. V. 4(1). P. 12–21.