

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НАНОЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА С НАНОРЕЛЬЕФОМ

Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов, Е. А. Рогачев, А. М. Парамонов, Е. А. Гасс

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Расчетные и экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса при кипении жидкостей, выполняющих роль теплоносителей, в настоящее время являются актуальными, так как охватывают многие области энергетики и могут способствовать развитию новых способов повышения эффективности энерговырабатывающих станций. При использовании наножидкостей в качестве теплоносителей при температуре насыщения с практической точки зрения интерес вызывают процессы осаждения наночастиц с последующим формированием нанослоя на горячей поверхности. Исследование процессов образования нанослоя при кипении имеет цель: оценка влияния отложений на теплообмен при кипении. В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что при достижении температуры насыщения в наножидкости формируются отложения на теплообменной поверхности, обладающие пористой структурой, что вызывает качественные изменения твердой поверхности нагревателя — изменяется величина шероховатости. При этом на начальном этапе величина шероховатости растет, что обусловлено осаждением наночастиц на поверхности нагрева, но через определенное время величина шероховатости убывает из-за выравнивания профиля отложений.

Ключевые слова: наножидкость, наночастицы, температура насыщения, кипение, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.

I. Введение

Расчетные и экспериментальные исследования процессов тепломассопереноса при кипении жидкостей, выполняющих роль теплоносителей, в настоящее время являются актуальными, так как охватывают многие области энергетики и могут способствовать развитию новых способов повышения эффективности энерговырабатывающих станций. Кипение — процесс образования пара в объеме жидкости. При погружении в жидкость нагреваемой поверхности (нагревателя) с температурой, которая однозначно должна превышать температуру насыщения суспензии, на внешней поверхности нагревателя начнется процесс образования пара. Величина перегрева определяется присутствием возможных центров образования пара (шероховатости, микровпадины и т.п.). Режим зародышевого кипения является одним из эффективных способов теплопередачи благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи и низкому перегреву поверхности нагрева. Режим пузырькового кипения ограничен началом зародышевого кипения и критическим тепловым потоком.

Изучение процесса кипения крайне сложно в связи с наличием множественных гидродинамических и термодинамических переменных. Поэтому имеются различные расчетные методики (в том числе и эмпирические) для определения коэффициента теплоотдачи при кипении. С созданием новых типов рабочих тел или теплоносителей, заметно влияющих на микрорельеф поверхностей нагрева, классические корреляции имеют ряд ограничений.

Наножидкость — относительно новый вид теплоносителя, являющийся дисперсией на основе воды (либо различных органических жидкостей) и наночастиц, отличающихся химическим составом и концентрациями [1, 2].

II. Постановка задачи

Исследование процессов образования нанослоя при кипении наножидкости имеет цель: оценка влияния отложений на теплообмен при кипении.

III. Теория

Существует два основных метода подготовки наножидкостей: одностадийный и двухстадийный. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. В одностадийном — наночастицы одновременно синтезируются и диспергируются в базовой жидкости. В двухстадийном методе эти процессы происходят раздельно. К преимуществам одностадийного метода можно отнести возможность контроля размера и морфологии наночастиц, меньший риск агрегации и окисления, лучший контроль над поверхностными свойствами. К недостаткам данного метода можно отнести относительную дороговизну и низкую производительность. При двухстадийном методе возможны промышленное производство и закупка наночастиц у производителя, после чего наночастицы добавляются в базовую жидкость и получается наножидкость. Такой метод удобнее и дешевле, чем одностадийный, однако риск агрегации больше. Кроме того, по мнению некоторых исследователей, двухстадийный метод при-

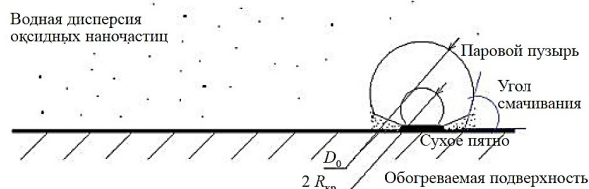


Рис. 1. Образование парового пузыря в дисперсии [1]
Fig. 1. Formation of a vapor bubble in the dispersion [1]

немим только для наножидкостей с использованием наночастиц из оксидов и не применим для наночастиц из чистых металлов [1]. В целях обеспечения стабильности коллоидного раствора (предотвращения агломерации и оседания наночастиц) крайне важно контролировать показатель pH жидкости и добавлять поверхностно-активные вещества (ПАВ) [3, 4].

Система для экспериментального и расчетного исследований — твердая поверхность — жидкость — состоит из гладкой или со стандартной величиной шероховатости поверхности нагрева и наножидкостью при температуре насыщения с концентрацией наночастиц до 0,1 %. Допускается, что наночастицы в жидкости движутся хаотично и не образуют отложения на поверхности до начала процесса кипения.

1. *Первые паровые пузыри.* Паровой пузырь формируется с критическим радиусом и увеличивается в размерах до значений отрывного диаметра.

В результате процессов парообразования в наножидкости наночастицы в пузырь полностью не переходят, а остаются на его внешних границах или перемещаются под пузырь, образуя жидкий микрослой (рис. 1) [1].

Согласно исследованиям различных авторов [1–6], основной причиной оседания наночастиц является регулярное формирование, отрыв и движение пузырей пара.

2. *Образование первого слоя — взаимодействие типа частица–поверхность.* Во время проведения экспериментальных исследований при кипении наножидкости отмечается формирование различных образований на твердой нагретой поверхности в виде отложений, количество и структура которых определяется тепломассообменными процессами в суспензии и фиксацией частиц на внешней твердой поверхности [1, 3, 5].

3. *Образование второго и последующих слоев частиц — взаимодействие типа частица–частица.* Отложения в виде покрытий на твердой поверхности формируются не равномерно по всей поверхности, а занимают определённые площади. По мере нарастания отложений эти площади переходят в области с более плотным строением, которые окружены «рыхлыми» отложениями. Это свидетельствует о формировании нанослоя на поверхности нагрева (нанорельефа). Возникающие неровности являются центрами парообразования.

4. *Влияние шероховатости нанослоя на коэффициент теплоотдачи при кипении.* Следует заметить важное влияние условий на поверхности теплообмена на процесс пузырькового кипения. Различного рода микронеровности, сформированный нанорельеф приводят к изменению кривой кипения, т.е. процессы происходят при меньших перегревах стенки [7].

Коэффициент теплоотдачи при кипении α в общем случае представляет собой отношение плотности теплового потока к разности температур стенки и насыщения.

$$\alpha = \frac{q}{t_c - t_n}, \quad (1)$$

где q — плотность теплового потока в Вт/м²;

t_n, t_c — температуры насыщения и стенки соответственно.

Из литературных источников [7–10] известны выражения для определения коэффициента теплоотдачи при кипении с учетом условий на поверхности (шероховатости)

$$\alpha = 31,4 \frac{P_c^{0,2}}{M^{0,1} T_c^{0,9}} (8R_a)^{\frac{1-p^*}{5}} \times \frac{(p^*)^{0,23}}{(1 - 0,99p^*)^{0,9}} q^{0,8}, \quad (2)$$

где $p^* = p_s/p_c$ отношение давлений;

p_s, p_c — рабочее и критическое давление (Па);

M — молярная масса (г/моль);

T_c — критическая температура (К);

R_a — среднеарифметическое отклонение профиля.

Таким образом, при пузырьковом кипении на коэффициент теплоотдачи оказывает влияние образование отложений, формирующих шероховатость поверхности.

IV. Результаты экспериментальных и расчетных исследований

Приготовление наножидкости — важный этап при экспериментальных исследованиях их теплофизических свойств. Для исследований, проводимых в лабораториях кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета, выбран двухэтапный метод получения наножидкости. В качестве базовой жидкости использовалась дистиллированная вода, в которой диспергировались наночастицы оксида алюминия (Al_2O_3) (рис. 2). Полученная суспензия помещалась в ультразвуковую ванну WUC-АОЗН, в которой происходила гомогенизация дисперсии, на период времени не менее 60 минут. В ходе подготовки наножидкостей применялись ПАВ. В ходе экспериментальных исследований установлено наличие стабильных теплофизических свойств полученного теплоносителя.

Для изучения процессов кипения, образования отложений и определения коэффициента теплоотдачи проведены экспериментальные исследования на кафедре «Теплоэнергетика». Опытный нагреваемый образец — нихромовая нить помещается внутрь сосуда с наножидкостью. Нить включена в электрическую цепь с автотрансформатором, с помощью которого осуществляется изменение мощности тока, подаваемого на нить и, как следствие, — изменение теплового потока от нити в жидкость. Электрическая мощность определяется по значению напряжения и силы тока. Величина электрического тока рассчитывается путем измерения падения напряжения на образцовом сопротивлении, включенном в цепь последовательно с исследуемым образцом. Температура наножидкости измеряется хромель-копелевыми термопарами [4].

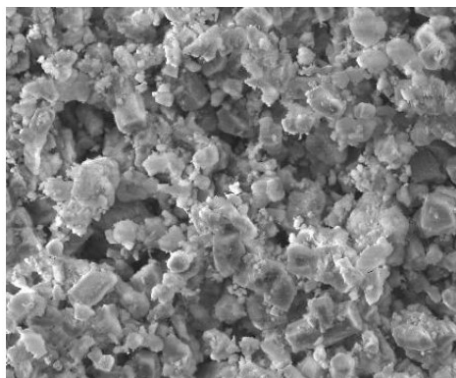
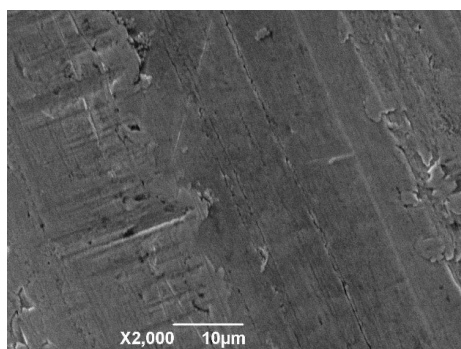
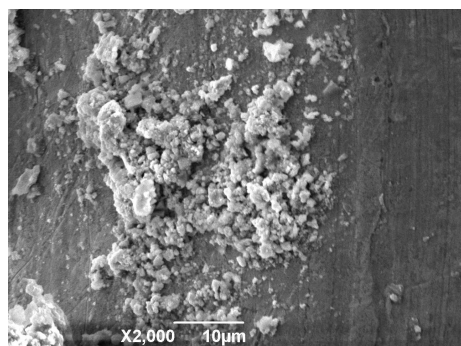


Рис. 2. Образец наночастиц:
оксид алюминия Al_2O_3
Fig. 2. Sample of nanoparticles: aluminum oxide
 Al_2O_3



a)



b)

Рис. 3. Образцы теплообменной поверхности
до (a) и после нагрева (б)
Fig. 3. Samples of the heat exchange surface
before (a) and after heating (б)

Величина шероховатости (наличие отложений) поверхности нагревателя определяется с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 3).

При оценке качества нагреваемой поверхности во время экспериментальных исследований установлено формирование пористого слоя на нагретой поверхности при кипении наножидкости. С учетом литературных данных и результатов экспериментальных исследований предполагается образование данного слоя за счет осаждения определенного количества наночастиц на поверхности нагревателя. Образование пористого слоя изменяет величину шероховатости и, следовательно, смачиваемости поверхности [1, 4].

Также определено, что нанослой образован из отдельных зерен, характерные размеры которых

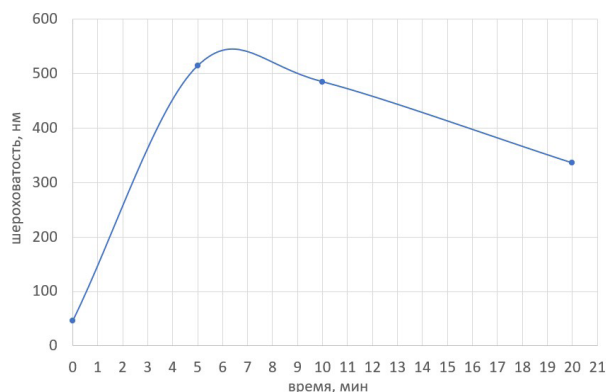


Рис. 4. График изменения шероховатости поверхности с течением времени
Fig. 4. Graph of surface roughness changes over time

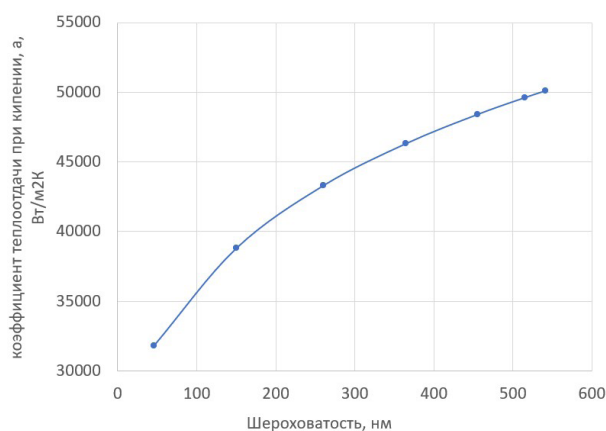


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи при кипении от шероховатости поверхности нагрева
Fig. 5. Dependence of the heat transfer coefficient at boiling on the roughness of the heating surface

сравнимы с размерами наночастиц в дисперсии (в среднем около 100 нанометров).

При проведении экспериментальных исследований на опытном стенде получены несколько образцов, покрытых наночастицами. Все образцы находились в одинаковых условиях, различалось только время пребывания в кипящей наножидкости. В научно-образовательном ресурсном центре «Нанотехнологии» образцы проанализированы под атомно-силовым микроскопом. Получены данные о структуре наночастиц на поверхности нитей.

По полученным данным был построен график изменения шероховатости поверхности с течением времени при плотности теплового потока $q = 1 \text{ МВт/м}^2$ и концентрации $C = 0,1 \%$ (рис. 4).

Значение шероховатости определено экспериментально, коэффициент теплоотдачи рассчитан в соответствии с выражением (2), предложенным в [8] (рис. 5).

Формирование слоя отложений вызывает изменение температуры стенки [11, 12]. Результаты расчетных исследований по определению зависимости температуры стенки от шероховатости представлены графически (рис. 6). Значение шероховатости определено экспериментально, температура стенки рассчитана в соответствии с уравнением (1).

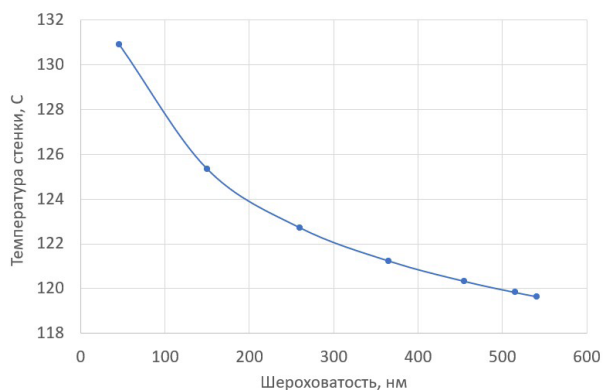


Рис. 6. Зависимость температуры стенки от шероховатости стенки

Fig. 6. Dependence of wall temperature on wall roughness

V. Обсуждения результатов

Со временем неровность нанослоя уменьшается, т.к. при отрыве парового пузыря часть частиц заполняет впадины и уменьшает глубину последних. Формируется новый слой отложений. Твердая поверхность становится более гладкой (рис. 4).

В области роста шероховатости, вызванного отложениями наночастиц, коэффициент теплоотдачи увеличивается. При уменьшении шероховатости из-за выравнивания внешней поверхности отложений коэффициент теплоотдачи уменьшается. Эта область не представлена на графике (рис. 5).

В области роста шероховатости от 50 до 550 нм, вызванного отложениями наночастиц, температура стенки уменьшается с 131 до 119 °C (рис. 6).

Изменение температуры стенки приводит к изменению перегрева жидкости. Это оказывает влияние на величину коэффициента теплоотдачи при кипении.

VI. Заключение

В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований процесса кипения суспензии (наножиждкости) на основе дистиллированной воды с добавлением наночастиц оксида алюминия сделаны следующие выводы:

— в ходе осуществления экспериментальных исследований установлено, что при кипении наножиждкости формируются пористые отложения на нагретой твердой поверхности;

— отмечено изменение шероховатости от 50 нм до 550 нм при концентрации наночастиц 0,1 % в жидкости с течением времени и постоянной плотности теплового потока 1МВт;

— экспериментально установлено, что со временем шероховатость, вызванная осаждением наночастиц из наножиждкости, возрастает, но через некоторое время поверхность становится более гладкой;

— в результате проведенных расчетных исследований показано, что увеличение шероховатости поверхности нагрева ведет к росту коэффициента теплоотдачи при кипении и уменьшению температуры поверхности нагрева.

Список источников

1. Сироткина А. Л., Федорович Е. Д., Сергеев В. В. Образование пористого слоя наночастиц на поверхности нагревателя при кипении наножиждкости // Теплофизика высо-

ких температур. 2018. Т. 56, № 5. С. 805–812. DOI: 10.31857/S004036440002710-5. EDN: VPUYOT.

2. Макеев А. Н., Кирюхин Я. А. Проблемы и перспективы использования наножиждкостей в теплоэнергетике // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49, № 3. С. 24–31. DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31. EDN: VAAQFW.

3. Okonkwo E. C., Wole-Osho I., Almanassa I. W. [et al.]. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. Vol. 145. P. 2817–2872. DOI: 10.1007/s10973-020-09760-2.

4. Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Гасс Е. А. Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения наножиждкости // Известия Трансиба. 2023. № 1 (53). С. 103–109. EDN: NYYGES.

5. Fedorovich E. D., Kovalenko A. N., Makukhin S. S. Modeling the Capillary Inflow of a Liquid to Dry Spots Above Vapor Bubbles as a Factor of Increasing the Critical Heat-Flux Density During the Boiling on a Porous Surface // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2022. Vol. 95, № 2. P. 473–483. DOI: 10.1007/s10891-022-02504-z.

6. Васильев Н. В., Варакин А. Ю., Зейгарник Ю. А. [и др.]. Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 6. С. 712–719. DOI: 10.7868/S0040364417060060. EDN: XHDQOH.

7. Справочник по теплообменникам. В 2 т. / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. Москва: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1. 560 с.

8. Henning F., Andrea L. Nucleate Boiling in Water for Different Pressures // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2008. Paper 982. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/982> (дата обращения: 21.02.2024).

9. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Application peculiarities of the high-temperature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers // Journal of physics: Conference series. Series 15th International Scientific and Technical Conference, PESPC 2020. Saratov. 2020. Vol. 1652. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037.

10. Лисинь Ч. Критический тепловой поток в микроканалах и в замкнутом пространстве. Обзор экспериментальных исследований и методов прогнозирования // Российский химический журнал. 2011. Т. LV, № 2. С. 85–98.

11. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножиждкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188. EDN: NDNMOT.

12. Rahimian A., Kazeminejad H., Khalafi H. [et al.]. Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement Using Electrophoretic Deposition of SiO₂ Nanofluid // Science and Technology of Nuclear Installations. 2019. Vol. 2019 (5-6). 1272156. P. 1–10. DOI: 10.1155/2019/1272156.

СЛОБОДИНА Екатерина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 3785-9045

ORCID: 0000-0002-5168-2502

ResearcherID: R-7340-2016

Адрес для переписки: slobodina_e@mail.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7337-8036

AuthorID (РИНЦ): 385534
AuthorID (SCOPUS): 56503044200

РОГАЧЕВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

ПАРАМОНОВ Александр Михайлович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8602-0554

AuthorID (РИНЦ): 664116

AuthorID (SCOPUS): 16474089900

ResearcherID: D-4355-2016

ГАСС Евгений Андреевич, магистрант кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Рогачев Е. А., Парамонов А. М., Гасс Е. А. Исследование интенсификации теплообмена при кипении наножидкости на поверхности нагрева с нанорельефом // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 2. С. 38–44. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-38-44.

Статья поступила в редакцию 22.04.2024 г.

© Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов,

Е. А. Рогачев,

А. М. Парамонов, Е. А. Гасс

THE STUDY OF HEAT TRANSFER INTENSIFICATION DURING BOILING OF A NANOFLUID ON A HEATING SURFACE WITH A NANORELIEF

E. N. Slobodina, A. G. Mikhailov, E. A. Rogachev, A. M. Paramonov, E. A. Gass

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The study of the boiling liquids processes is currently relevant, as it affects many energy areas and can offer new ways to improve the efficiency of energy plants. The properties and the nanolayer formation processes on the heater surface are the area of interest. Modification of the heater surface in power machinery with the formation of a porous layer on them is more promising than using nanofluid as a heat transfer fluid. The research of the nanolayer formation a during boiling provides insights into its properties and its effect on heat transfer during boiling. It has been experimentally established that when the suspension boils, porous deposits form on the heat exchange surface. Initially, the roughness caused by the deposition of nanoparticles increases, but after a while it begins to decrease due to the alignment of the sediment profile.

Keywords: nanofluid, nanoparticles, saturation temperature, boiling, heat transfer, heat transfer coefficient.

References

1. Sirotkina A. L., Fedorovich E. D., Sergeyev V. V. Obrazovaniye poristogo sloya nanochastits na poverkhnosti nagrevatelya pri kipenii nanozhidkosti [Formation of a porous nanoparticle layer on a heater surface upon the boiling of a nanofluid] // *Teplofizika vysokikh temperature. High Temperature*. 2018. Vol. 56, no. 5. P. 805–812. DOI: 10.31857/S004036440002710-5. EDN: VPUYOT. (In Russ.).
2. Makeyev A. N., Kiryukhin Ya. A. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya nanozhidkostey v teploenergetike [Problems and prospects for the use of nanofluids in thermal power engineering] // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022. Vol. 49, no. 3. P. 24–31. DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31. EDN: VAAQFW. (In Russ.).
3. Okonkwo E. C., Wole-Osho I., Almanassra I. W. [et al.]. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. Vol. 145. P. 2817–2872. DOI: 10.1007/s10973-020-09760-2. (In Engl.).
4. Slobodina E. N., Mikhailov A. G., Gass E. A. Eksperimental'nyye i raschetnyye issledovaniya protsessy kipeniya nanozhidkosti [Experimental and computational studies of the nanofluidic boiling process] // *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 1 (53). P. 103–109. EDN: NYYGES. (In Russ.).
5. Fedorovich E. D., Kovalenko A. N., Makukhin S. S. Modeling the Capillary Inflow of a Liquid to Dry Spots Above Vapor Bubbles as a Factor of Increasing the Critical Heat-Flux Density During the Boiling on a Porous Surface // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2022. Vol. 95, no. 2. P. 473–483. DOI: 10.1007/s10891-022-02504-z. (In Engl.).
6. Vasilyev N. V., Varaksin A. Yu., Zeygarnik Yu. A. [i dr.] Kharakteristiki kipeniya vody, nedogretoy do temperatury nasyshcheniya, na strukturirovannykh poverkhnostyakh [Characteristics of subcooled water boiling on structured surfaces] // *Teplofizika vysokikh temperatur. High Temperature*. 2017. Vol. 55, no. 6. P. 712–719. DOI: 10.7868/S0040364417060060. EDN: XHDQOH. (In Russ.).
7. Spravochnik po teploobmennikam. V 2 t. [Handbook of heat exchangers. In 2 vols.] / trans. from Engl. by O. G. Martynenko [et al.]. Moscow, 1987. Vol. 1. 560 p. (In Russ.).
8. Henning F., Andrea L. Nucleate Boiling in Water for Different Pressures // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2008. Paper 982. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/982> (accessed: 21.02.2024). (In Engl.).
9. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Application peculiarities of the higherature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers // *Journal of physics: Conference series*. Series 15th International Scientific and Technical Conference, PESPC 2020". Saratov. 2020. Vol. 1652. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037.10. (In Engl.).
10. Lisin' Ch. Kriticheskiy teplovoy potok v mikrokanalakh i v zamknutom prostranstve. Obzor eksperimental'nykh issledovaniy i metodov prognozirovaniya [Critical heat flow in microchannels and in a confined space. Review of experimental studies and forecasting methods] // *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. Russian Journal of General Chemistry*. 2011. Vol. LV, no. 2. P. 85–98. (In Russ.).
11. Terekhov V. I., Kalinina S. V., Lemanov V. V. Mekhanizm teploperenosa v nanozhidkostyakh: sovremennoye sostoyaniye problemy (obzor). Chast' 2. Konvektivnyy teploobmen [The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer] // *Teplofizika i aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 2010. Vol. 17, no. 2. P. 173–188. EDN: NDNMOT. (In Russ.).
12. Rahimian A., Kazeminejad H., Khalafi H. [et al.]. Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement Using Electrophoretic Deposition of SiO₂ Nanofluid // *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2019. Vol. 2019 (5-6). 1272156. P. 1–10. DOI: 10.1155/2019/1272156. (In Engl.).



Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 3785-9045

ORCID: 0000-0002-5168-2502

ResearcherID: R-7340-2016

Correspondence address: slobodina_e@mail.ru

MIKHAILOV Andrey Garrievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7337-8036

AuthorID (RSCI): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

ROGACHEV Evgeniy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1373-4622

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

PARAMONOV Aleksandr Mikhaylovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of

Heat and Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8602-0554

AuthorID (RSCI): 664116

AuthorID (SCOPUS): 16474089900

ResearcherID: D-4355-2016

GASS Evgeniy Andreyevich, Undergraduate of Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.

For citations

Slobodina E. N., Mikhailov A. G., Rogachev E. A., Paramonov A. M., Gass E. A. The study of heat transfer intensification during boiling of a nanofluid on a heating surface with a nanorelief // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 38–44. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-38-44.

Received April 22, 2024.

© E. N. Slobodina, A. G. Mikhailov,
E. A. Rogachev,
A. M. Paramonov, E. A. Gass