

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 6. С. 279–288
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 6, pp. 279–288

Научная статья
УДК 536.248.2
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185574>
EDN: <https://www.elibrary.ru/IKTARL>

Краткий обзор исследований интенсификации теплообмена при кипении с помощью модификации греющей поверхности, посвященный 90-летию со дня рождения Владимира Михайловича Жукова

Ю.А. Кузма-Кичта¹, В.А. Леньков², Н.В. Васильев³✉

¹Национальный исследовательский институт «МЭИ», Москва, Российская Федерация

^{2,3}Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация

³nikvikvas@mail.ru✉

Аннотация. 4 октября 2025 г. исполнится 90 лет со дня рождения выдающегося ученого-теплофизика, лауреата Государственной Премии СССР, с.н.с. Жукова Владимира Михайловича, на протяжении 20-ти лет являвшегося заместителем заведующего отделом теплообмена ОИВТ РАН.

Владимир Михайлович Жуков внес значительный вклад в исследование теплообмена при фазовых превращениях различных теплоносителей от жидкометаллических до криогенных. В данной статье представлены результаты исследований последнего периода его деятельности, посвященного изучению влияния модификации поверхности на интенсификацию теплообмена при кипении различных жидкостей (азота, воды, хладагента R113). Представленные результаты были получены на поверхностях, модифицированных с помощью нанесения лунок, покрытий из наночастиц, полученных при кипении наножидкости, и созданных методом микродугового оксидирования (МДО). Исследования проводились при охлаждении твердых сфер и цилиндров в диапазоне температурных напоров, охватывающем пузырьковый, переходный и пленочный режимы кипения при атмосферном давлении в условиях свободной конвекции. Обнаружено, что данные методы модификации поверхности теплообмена приводят к сокращению времени охлаждения тел благодаря увеличению теплоотдачи в различных режимах кипения и плотностей критических тепловых потоков.

Ключевые слова: кипение, нестационарное охлаждение, интенсификация теплоотдачи, модификация поверхности, микродуговое оксидирование, наножидкость

Для цитирования. Кузма-Кичта Ю.А., Леньков В.А., Васильев Н.В. Краткий обзор исследований интенсификации теплообмена при кипении с помощью модификации греющей поверхности, посвященный 90-летию со дня рождения Владимира Михайловича Жукова // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 6. С. 279–288. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185574>

Original article

A brief review of research on the intensification of heat transfer during boiling using modification of the heating surface, dedicated to the 90th anniversary of the birth of Vladimir Mikhailovich Zhukov

Yu.A. Kuzma-Kichta¹, V.A. Len'kov², N.V. Vasil'ev³✉

¹National Research Institute "MPEI", Moscow, Russian Federation

^{2,3}Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³nikvikvas@mail.ru✉

Abstract. The article is dedicated to the memory (90th anniversary of birth) of the outstanding scientist-thermophysicist, laureate of the USSR State Prize, candidate of technical sciences, senior researcher Vladimir Mikhailovich Zhukov, who for 20 years was the deputy head of the heat transfer department of the JIHT RAS. Vladimir Mikhailovich Zhukov made a significant contribution to the study of heat transfer during phase transformations of various coolants from liquid metal to cryogenic. This article presents the results of research in the last period of his activity, devoted to the study of the effect of surface modification on the intensification of heat transfer during boiling of various liquids (nitrogen, water, freon R113). The presented results were obtained on surfaces modified by applying dimples, coatings of nanoparticles obtained by boiling a nanofluid and created by the microarc oxidation (MAO) method. The studies were conducted with non-stationary cooling of solid spheres and cylinders in the range of temperature differences covering bubble, transitional and film boiling modes at atmospheric pressure under free convection conditions. It was shown that the application of micro- and nanoporous coatings of the types under consideration leads to a significant reduction in the cooling time of spheres heated above the Leidenfrost temperature, an increase in the heat transfer coefficients, the second critical heat flux density and the corresponding temperature difference during the boiling of nitrogen, water and freon R113. During his long and fruitful scientific life, V.M. Zhukov studied the boiling of a wide range of liquids - sodium, helium, nitrogen, various freons, water on surfaces with relief on the macro-, micro- and nanoscales under conditions of free and forced convection, as well as the boiling of cryogenic liquids in the field of action of centrifugal forces. He managed to discover and explain the features of unstable boiling of liquid metal and these unique results were reflected in many domestic and foreign monographs. Overcoming multiple experimental difficulties tempered V.M. Zhukov and allowed him to develop a strong and purposeful character. Colleagues noted his outstanding pedagogical abilities, intolerance to manifestations of lack of will in assistants. His scientific supervisor was the head of the heat exchange department of the Institute of Heat Transfer of the USSR Academy of Sciences, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences Petukhov B.S., and his closest associate was an outstanding specialist in the field of heat exchange during boiling, professor, Doctor of Technical Sciences Sergei Alekseevich Kovalev. As a feature of V.M. As a researcher, it should be noted that in his works Zhukov paid special attention to the novelty of the method of heat exchange intensification, its potential practical application and the reliability of the results obtained.

Keywords: boiling, non-stationary cooling, heat transfer enhancement, surface modification, microarc oxidation, nanofluid

For citation. Kuzma-Kichta Yu.A., Len'kov V.A., Vasil'ev N.V. A brief review of research on the intensification of heat transfer during boiling using modification of the heating surface, dedicated to the 90th anniversary of the birth of Vladimir Mikhailovich Zhukov. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 6, pp. 279–288. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185574>

Введение

За свою продолжительную и плодотворную научную жизнь Владимир Михайлович Жуков занимался исследованиями кипения широкого круга жидкостей – натрия, гелия, азота, различных хладонов, воды на поверхностях с рельефом на макро-, микро- и наномасштабах в условиях свободной и вынужденной конвекции, а также кипением криогенных жидкостей в поле действия центробежных сил. Ему удалось обнаружить и объяснить особенности неустойчивого кипения жидкого металла и эти уникальные результаты нашли отражение во многих отечественных и зарубежных монографиях. Преодоление множественных экспериментальных трудностей закалило В.М. Жукова и позволило выработать твердый и целеустремленный характер. Коллеги отмечали его незаурядные педагогические способности, нетерпимость к проявлениям безволия в помощниках. Его научным руководителем был заведующий отделом теплообмена ИВТ АН СССР чл.-корр. АН СССР Петухов Б.С., ближайшим соратником был выдающийся специалист в области теплообмена при кипении профессор, д.т.н. Сергей Алексеевич Ковалев.

В завершающий период научной деятельности В.М. Жуков вместе со своей научной группой работал в перспективной области исследований влияния различного вида модификаций греющей поверхности на интенсификацию теплообмена при кипении [1–4]. Одним из таких широко известных и распространенных методов модификации поверхности является нанесение покрытий спеканием металлических микрочастиц при температурах, близких к температурам их плавления. Данная технология с помощью варьирования размеров частиц, режимов спекания и др. позволяет получать оптимальную пористость покрытия – для большинства ситуаций это ~40–50 %. К плюсам данного метода относятся высокая степень адгезии с подложкой, прочность, надежность и долговечность покрытия. Например, в работе [5] было достигнуто увеличение коэффициента теплоотдачи (КТО) при кипении воды в 5–8 раз с помощью нанесения покрытия из бронзовых микросфер. А авторам работы [6] удалось увеличить КТО до 7 раз и первую критическую плотность теплового потока ($q_{кр1}$) до трех раз благодаря нанесению покрытия из медных частиц средним диаметром 25 мкм.

Одним из эффективных и получивших достаточно широкое распространение методов интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах является нанесение на теплоотдающую поверхность полусферических лунок [7–11]. Полусферические лунки обеспечивают интенсивный тепломассообмен между пограничным слоем и ядром потока. В настоящее время известно большое число работ, посвященных изучению интенсификации теплообмена в однофазных средах с помощью лунок, наносимых на поверхности нагрева, тогда как теплообмен при кипении остается мало исследованным. Следует отметить работу [9], в которой изучался кризис теплоотдачи при течении недогретой воды в кольцевых каналах с лунками, а также работу [11], посвященную исследованию теплообмена в закризисной области пароводяной смеси высокого давления в кольцевом парогенерирующем канале с лунками.



Рис. 1. Фотография В.М. Жукова

В научной группе В.М. Жукова исследовался метод модификации поверхности с помощью осаждения на ней наночастиц при кипении наножидкости, быстро завоевавший популярность. Наножидкости представляют собой коллоидные растворы наночастиц (с характерным размером 1–100 нм) в жидком растворителе. В качестве материалов наночастиц обычно используются оксиды металлов: Al_2O_3 , CuO , TiO_2 и др. Толщина и морфология такого покрытия в основ-

ном зависят от концентрации, размеров и материала наночастиц, а также от режима кипения. В результате образования покрытия при кипении наножидкости отмечались существенное улучшение характеристик смачивания поверхности [12] и усиление капиллярных эффектов [13], что позволило авторам данных работ прийти к выводу об определяющем влиянии именно сформированного покрытия на наблюдаемое увеличение $q_{кр1}$.

Жуков В.М. оказался одним из первых, кто исследовал, как выяснилось, очень перспективный метод модификации поверхности кипения с помощью микродугового оксидирования (МДО). Данная технология позволяет формировать тонкие пористые покрытия толщиной и размерами пор от единиц до нескольких десятков микрометров на поверхности вентильных металлов (алюминий, титан, цирконий и др.). К достоинствам этого метода можно отнести формирование керамических покрытий, обладающих высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью, теплостойкостью. Технология позволяет наносить покрытие на поверхности сложной геометрии (например, на внутреннюю поверхность труб). Из относительно небольшого количества работ по интенсификации теплоотдачи при кипении на поверхностях с МДО-покрытиями отметим [14] и [15]. Авторами работы [14] была получена интенсификация теплоотдачи на 20–30 % на поверхности с МДО-покрытием из TiO_2 толщиной 10 мкм по сравнению с гладкой поверхностью подложки из Ti при кипении недогретой воды. В работе [15] с помощью нанесения покрытия методом МДО на поверхность дюрали удалось увеличить КТО при кипении насыщенного азота в большом объеме на 50–60 %. В обоих работах интенсификация была получена для условий атмосферного давления.

Результаты исследований В.М. Жукова по интенсификации теплообмена с помощью модификации греющей поверхности

В качестве особенности В.М. Жукова как исследователя нужно отметить, что в своих работах особое внимание он уделял новизне метода интенсификации теплообмена, его потенци-

альному практическому применению и достоверности получаемых результатов. Далее последовательно рассмотрим результаты исследований влияния трех типов модификации поверхности (с помощью лунок и покрытий, нанесенных при кипении наножидкости и методом микродугового оксидирования) на интенсификацию теплообмена при кипении в режиме охлаждения, относящихся к завершающему периоду его научной деятельности и отраженных в публикациях [16–24].

1. Исследования интенсификации кипения с помощью нанесения лунок на поверхность теплообмена

В работах научной группы под руководством В.М. Жукова [16, 17] представлены результаты исследований теплообмена и механизма пленочного и переходного кипения азота, хладагента R113 и воды на облуненных сферах и вертикальных цилиндрах в условиях большого объема и естественной циркуляции в вертикальных кольцевых каналах с шириной зазора 1,5 мм. На образцы наносились полусферические лунки диаметром $d = 3$ мм, глубиной $h = 0,5$ мм, $h/d = 0,17$ (рис. 2). Плотность распределения лунок на поверхности сфер составляла 45%, а цилиндров – 37 %. В ряде опытов путем нанесения на облуненную поверхность малотеплопроводного покрытия в виде клеевой теплостойкой пленки толщиной 10 мкм или слоя наночастиц осуществлялась комбинированная модификация поверхности [18].

На рис. 3 представлены графики изменения температуры сфер во времени от начальной температуры – 280 К до температуры насыщения азота при атмосферном давлении для образцов с различными способами модификации поверхности в условиях большого объема и естественной циркуляции. Как видно из рисунка, использование интенсификаторов в виде луночного рельефа и малотеплопроводного покрытия при естественной конвекции существенно сокращает время захлаживания сфер по сравнению с гладкой поверхностью. Так, время охлаждения образцов для гладкой сферы, равное приблизительно 140 с (кривая 1 на рис. 3), сократилось для облуненной сферы с покрытием до 60 с (кривая 6 на рис. 3).

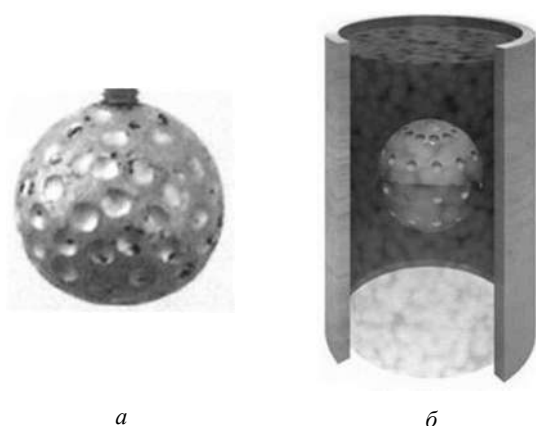


Рис. 2. Медная сфера ($d = 20$ мм) с лунками ($d = 3$ мм, глубиной $h = 0,5$ мм, $h/d=0,17$) – а; б – 3D-модель кольцевого цилиндрического канала со сферой с луночным рельефом, зазор между трубкой и сферой $\delta = 1,5$ мм, [17]

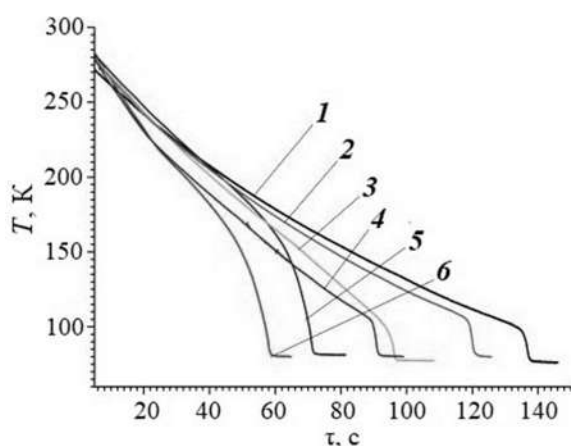


Рис. 3. Охлаждение сфер в жидком азоте при атмосферном давлении: 1 – гладкая сфера, большой объем; 2 – гладкая сфера, естественная циркуляция; 3 – сфера с лунками, большой объем; 4 – сфера с лунками, естественная циркуляция; 5 – сфера с лунками и покрытием, большой объем; 6 – сфера с лунками и покрытием, естественная циркуляция, [16, 18]

Приведенные на рис. 4 данные о теплоотдаче для гладкой и облуненной сфер демонстрируют эффективность луночного рельефа без покрытия и с малотеплопроводным покрытием на поверхности сфер в условиях естественной циркуляции в вертикальном кольцевом канале с шириной зазора 1,5 мм. Наибольшее увеличение коэффициента теплоотдачи наблюдалось для сферы с лунками и малотеплопроводным покрытием (кривая 3 на рис. 4) во всем исследованном диапазоне температурных напоров, охватывающем переходный и пленочный режимы кипения жидкого азота. Результаты при кипении на поверхности цилиндров при схожих условиях качественно показали те же тенденции по интенсификации теплообмена.

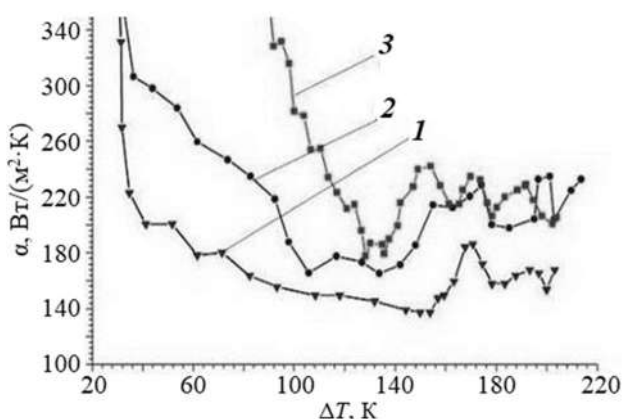


Рис. 4. Изменения коэффициента теплоотдачи от температурного напора (ΔT) при охлаждении сфер в азоте при атмосферном давлении в условиях естественной циркуляции в вертикальном кольцевом канале с шириной зазора 1,5 мм: 1 – гладкая сфера; 2 – сфера с лунками; 3 – сфера с лунками и малотеплопроводным покрытием, [17]

2. Кипение на поверхностях с нанопокрывтием, полученных при кипении наножидкостей

Для исследования теплоотдачи в области пленочного, переходного и пузырькового кипения В.М. Жуковым с коллегами проводились эксперименты по охлаждению в воде и наножидкости сферы из латуни диаметром 20 мм, нагретой выше температуры Лейденфроста [19]. Наножидкость представляла собой воду с наночастицами Al_2O_3 , содержание которых составляло $\sim 0,005\%$. Размер наночастиц не превышал 100 нм.

На рис. 5 представлена микрофотография поверхности сферы с покрытием из осажденных при кипении наножидкости частиц, полученная с помощью электронного микроскопа Sigma Zeiss, на которой видно неоднородное распределение пор по размерам и в пространстве.

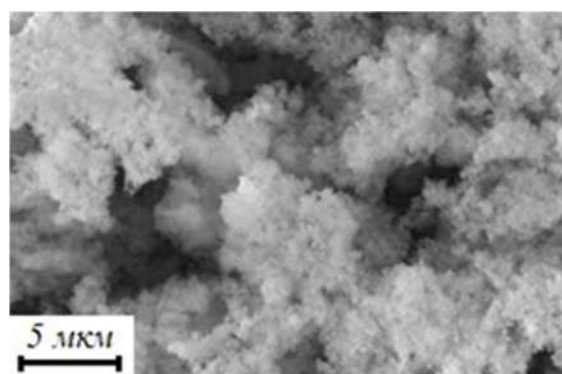


Рис. 5. Микрофотография покрытия из наночастиц Al_2O_3 на латунной поверхности, [19]

При кипении наножидкости на поверхности нагрева образуется покрытие из наночастиц, что приводит к деформации кривой кипения. При температуре жидкости, равной температуре насыщения, было показано, что влияние наночастиц на теплообмен не очень существенно, но при недогревах жидкости $\Delta T_{\text{нед}} = 10\text{--}15\text{ К}$ оно усиливается (рис. 6). При этих недогревах жидкости в области высоких температурных напоров от 200 до 250 К мгновенно возникает переходный режим с высокой интенсивностью отвода тепла и отсутствует «классический» режим пленочного кипения. Из рис. 3 видно, что при недогревах 10 и 15 К на кривых кипения наблюдаются максимумы, появление которых, вероятно, связано с особенностями механизма кипения жидкости для исследованных условий.

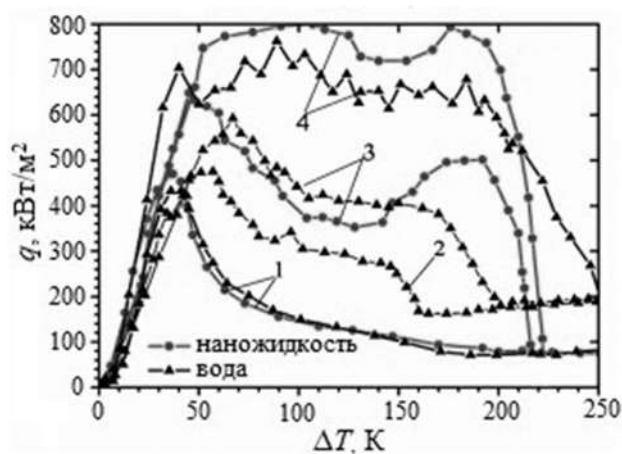


Рис. 6. Влияние недогрева на кривые кипения наножидкости и воды на поверхности латунной сферы: 1 — $\Delta T_{\text{нед}} = 0$; 2 — $\Delta T_{\text{нед}} = 5\text{ К}$; 3 — $\Delta T_{\text{нед}} = 10\text{ К}$; 4 — $\Delta T_{\text{нед}} = 15\text{ К}$, [19]

3. Кипение на поверхностях, полученных с помощью метода микродугового оксидирования

Метод микродугового оксидирования применяется для получения многофункциональных покрытий на деталях изделий различных отраслей промышленности, по большей части, для защиты от коррозии и износа. Толщина покрытий для такого рода применений составляет несколько сотен микрон. При нанесении же данным способом тонких покрытий толщиной от единиц до нескольких десятков мкм они обладают достаточной пористостью (до нескольких десятков %) для задач интенсификации теплообмена при кипении и наличием потенциальных центров па-

рообразования. Направление исследований влияния модификации поверхности методом МДО в контексте влияния микропористых покрытий на теплообмен при кипении возникло ввиду сложности нанесения такого рода покрытий на внутреннюю поверхность алюминиевых труб, широко используемых в теплообменных аппаратах различного применения с фазовым переходом теплоносителя.

В ОИВТ РАН научная группа под руководством В.М. Жукова (В.А. Ленков, К.И. Белов и др.) одной из первых в России и мире стала заниматься исследованиями влияния модификации греющей поверхности методом МДО на интенсификацию теплообмена при кипении. Исследования проводились на трех видах жидкостей, сильно отличающихся по свойствам — азоте, воде и хладоне R113. Опыты при кипении азота проводились на гладких сферах из Д16Т и сферах с пористым покрытием из Al_2O_3 нагретых до 300 К при температуре насыщения азота и атмосферном давлении. Формирование покрытий на сфере ($d = 25\text{ мм}$) проводилось методом МДО [20–24].

На рис. 7 приведено изображение МДО-покрытия на поверхности сферы, полученное с помощью электронного микроскопа Sigma Zeiss, на котором видно, что такое покрытие имеет капиллярно-пористую структуру с неоднородным распределением пор размерами от 0,1 мкм до 2–4 мкм. В зависимости от режимов обработки доля открытой пористости изменяется от 40 % до 20%. Для сферы с покрытием были установлены рост теплоотдачи при пленочном кипении азота, а также плотности теплового потока ($q_{\text{кр}2}$) и температурного напора ($\Delta T_{\text{кр}2}$), при которых прекращается режим пленочного кипения (рис. 8).

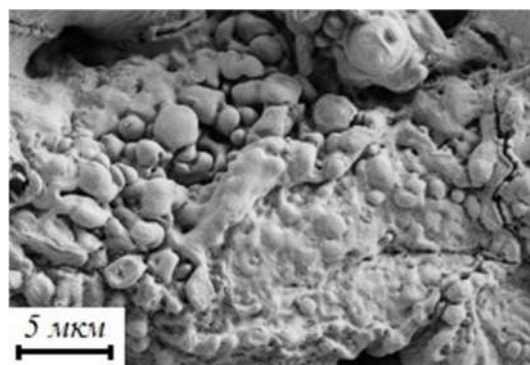


Рис. 7. Микрофотография покрытия, полученного методом МДО, [20]

На рис. 9 представлены изменения температуры от времени для сфер из Д16Т с МДО-покрытиями и без покрытий при их охлаждении от начальной температуры 625 К в воде при температуре насыщения и с небольшим недогревом ($\Delta T_{\text{нед}}$) до 15 К. Обнаружено, что МДО-покрытие приводит к существенному сокращению времени охлаждения по сравнению с образцами без покрытия, что свидетельствует об увеличении интенсивности отвода теплоты. Рост недогрева воды также приводит к уменьшению времени охлаждения сферы.

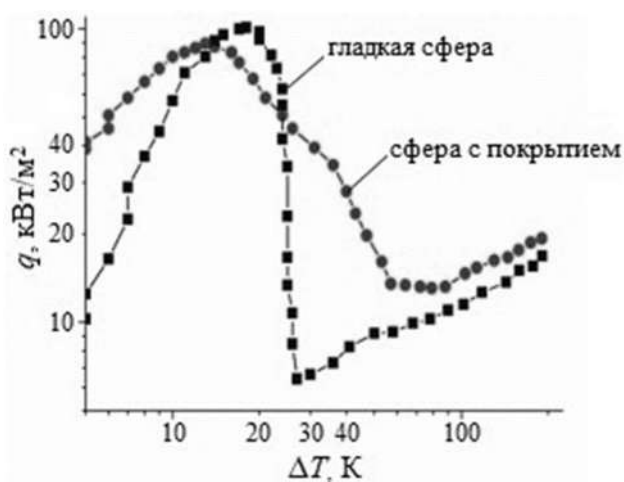


Рис. 8. Кривые кипения азота на гладкой сфере Д16Т ($d = 25$ мм) и сфере с МДО-покрытием, [20]

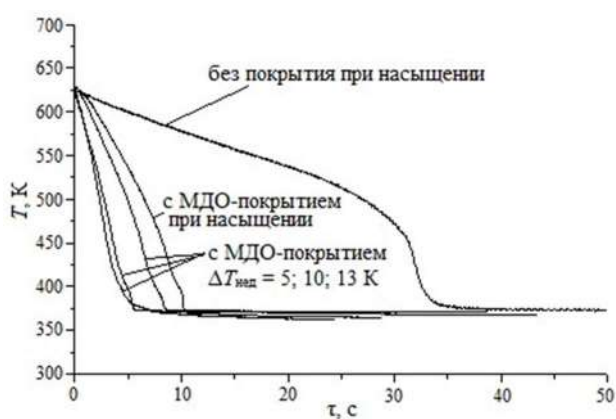


Рис. 9. Изменение температуры от времени для гладких сфер из Д16Т и с МДО-покрытиями при охлаждении в воде, [22]

На рис. 10 представлены кривые кипения насыщенной и недогретой воды для гладких сфер из Д16Т, а на рис. 11 для сфер с МДО-покрытиями. Прежде всего, следует отметить, существенную деформацию кривой кипения воды. Расширяется область переходного кипения,

растет величина $\Delta T_{\text{кр}2}$. Показано также, что покрытие приводит к увеличению интенсивности отвода тепла при пленочном кипении насыщенной воды. С увеличением недогрева зона переходного кипения с высокими q заметно расширяется, а теплоотдача интенсифицируется. В области пузырькового кипения недогретой воды основное влияние оказывает величина недогрева до температуры насыщения, влияние пористых покрытий прослеживается слабо. Скорее всего, это связано с изменением механизма кипения.

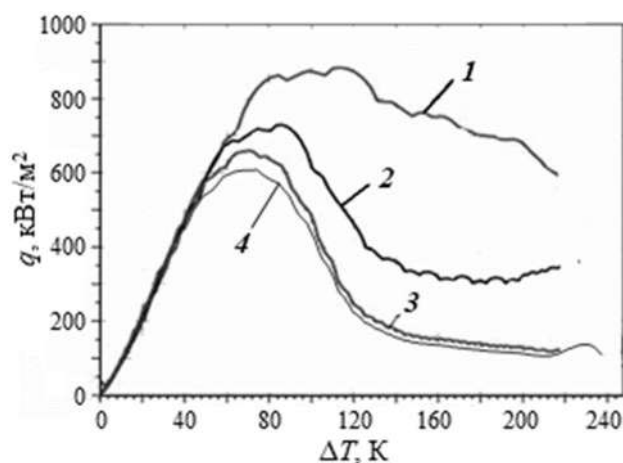


Рис. 10. Кривые кипения воды на гладкой сфере из Д16Т при нестационарном охлаждении: 1 – $\Delta T_{\text{нед}} = 26$ К, 2 – $\Delta T_{\text{нед}} = 8$ К, 3 – $\Delta T_{\text{нед}} = 4$ К, 4 – $\Delta T_{\text{нед}} = 0$, [22]

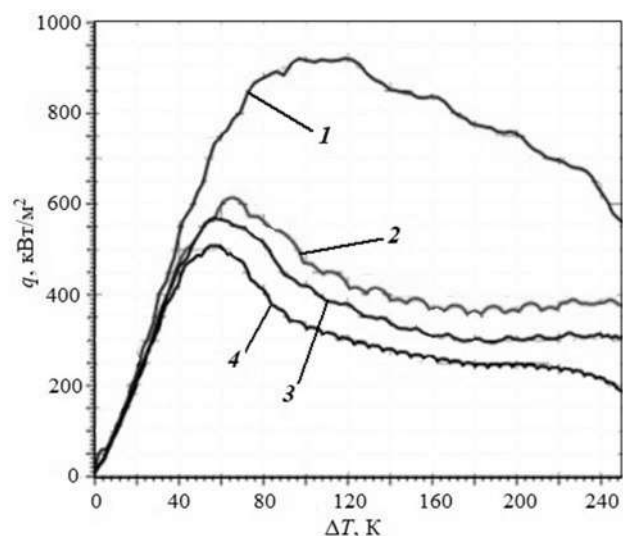


Рис. 11. Кривые кипения воды на сфере из Д16Т с МДО-покрытием при нестационарном охлаждении: 1 – $\Delta T_{\text{нед}} = 20$ К, 2 – $\Delta T_{\text{нед}} = 12$ К, 3 – $\Delta T_{\text{нед}} = 5$ К, 4 – $\Delta T_{\text{нед}} = 0$, [22]

На рис. 12 и 13 приведено сравнение кривых кипения хладона R113 на гладкой сфере из Д16Т

и сфере с МДО-покрытием при нестационарном охлаждении. Как и при охлаждении в азоте наблюдается более раннее прекращение пленочного режима кипения при более высоких значениях $\Delta T_{кр2}$. Теплоотдача увеличивалась до 30%. Увеличение недогрева жидкости приводит к росту критического теплового потока и теплоотдачи во всем исследуемом диапазоне температурных напоров. Нанесение МДО-покрытия позволило увеличить первую критическую плотность теплового потока. При этом с ростом недогрева относительное увеличение $q_{кр1}$ росло, при наиболее высоких недогревах ($\Delta T_{нед} = 20$ К) оно достигало $\sim 70\%$.

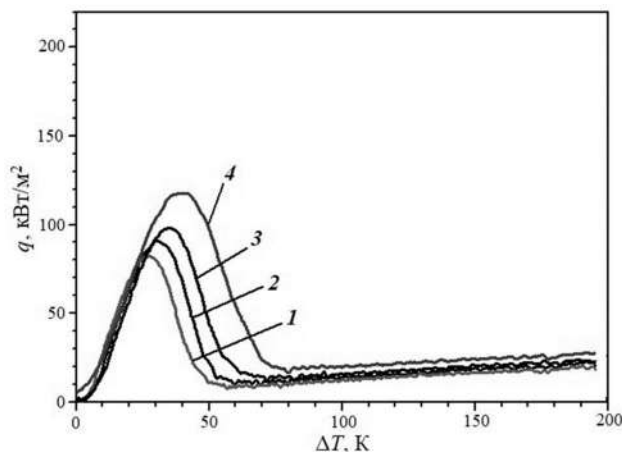


Рис. 12. Кривые кипения хладагента R113 на гладкой сфере из Д16Т: 1 – $\Delta T_{нед} = 0$, 2 – $\Delta T_{нед} = 5$ К, 3 – $\Delta T_{нед} = 10$ К, 4 – $\Delta T_{нед} = 20$ К, [22]

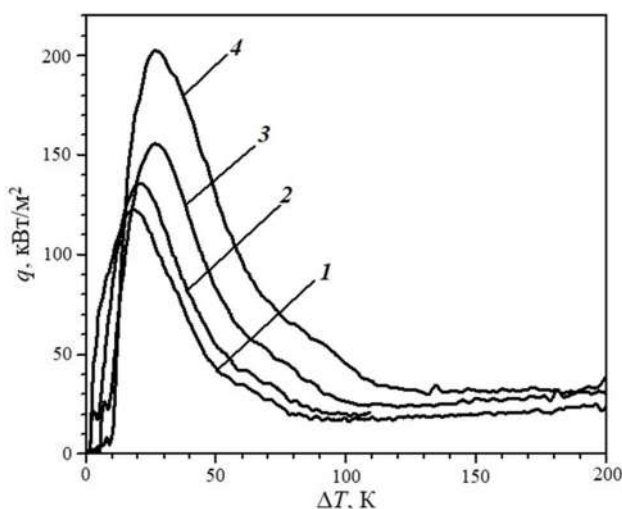


Рис. 13. Кривые кипения хладагента R113 на сфере из Д16Т с МДО-покрытием при нестационарном охлаждении: 1 – $\Delta T_{нед} = 0$, 2 – $\Delta T_{нед} = 5$ К, 3 – $\Delta T_{нед} = 10$ К, 4 – $\Delta T_{нед} = 20$ К, [22]

Заключение

Представлен краткий обзор работ выдающегося ученого-теплофизика Владимира Михайловича Жукова, посвященных интенсификации теплообмена при кипении в режиме охлаждения с помощью модификации греющей поверхности, и они свидетельствуют о его исключительной изобретательности и проницательности.

Описаны результаты, полученные с использованием трех типов модификации поверхности: с помощью нанесения лунок и покрытий, нанесенных при кипении наножидкости и методом микродугового оксидирования. Показано, что модификации поверхности теплообмена рассматриваемых видов приводят к существенному сокращению времени охлаждения нагретых выше температуры Лейденфроста сфер и цилиндров, увеличению теплоотдачи, второй критической плотности теплового потока ($q_{кр2}$) и соответствующего температурного напора ($\Delta T_{кр2}$) при кипении азота, воды и хладагента R113.

Список источников

1. Кузма-Кичта Ю.А. Исследование интенсификации теплосъема и разработка рекомендаций для расчета теплогидравлических характеристик в докритической и закризисной областях парогенерирующих каналов: Дисс. ... докт. техн. наук. М, 1989. 40 с.
2. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 1–54.
3. Liang G., Mudawar I. Review of pool boiling enhancement by surface modification // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 128. pp. 892–933.
4. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 2. С. 280–312.
5. Wang X.S., Wang Z.B., Chen Q.Z. Research on manufacturing technology and heat transfer characteristics of sintered porous surface tubes // Adv. Mater. Res. 2010. Vol. 97–101. pp. 1161–1165.
6. Jun S., Wi H., Gurung A. et al. Pool boiling heat transfer enhancement of water using brazed copper microporous coatings // Journal of Heat Transfer. 2016. Vol. 138. № 7. DOI: 10.1115/1.4032988
7. Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К., Подымака Н.Ф. и др. Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки // Доклады Академии наук. 1986. Т. 291. № 6. С. 1315–1318.
8. Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С. и др. Интенсификация теплообмена сферическими выемками

- при воздействии возмущающих факторов. Казань: КГТУ, 2003. 142 с.
9. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю. А., Леонтьев А.И. и др. Интенсификация тепло-и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. М.: ФГУП «ЦНИИАТО-МИНФОРМ», 2008, 532 с.
 10. Кикнадзе Г.И., Крючков И.И., Чушкин Ю.В. Кризис теплоотдачи при самоорганизации смерчеобразных вихревых структур: Препринт ИАЭ № 4841/3. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989.
 11. Мостинский И.Л., Гешеле В.Д., Горьянов Д.А. и др. Критические тепловые потоки и теплоотдача в за-кризисной области от поверхности, покрытой лунками // Инженерно-физический журнал. 2003. № 10. С. 49–53.
 12. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J. et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50. № 19. pp. 4105–4116. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002
 13. Kim H.D., Kim M.H. Effect of nanoparticle deposition on capillary wicking that influences the critical heat flux in nanofluids // *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 91. DOI: 10.1063/1.2754644
 14. Васильев Н.В., Вараксин 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.
 15. Kuznetsov D., Pavlenko A. Heat transfer during nitrogen boiling on surfaces modified by microarc oxidation // *Energies*. 2022. Vol. 15. № 16. DOI: 10.3390/en15165792
 16. Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Yu.A., Lenkov V. et al. Enhancement of heat transfer at transition and film boiling of nitrogen on spheres with dimples and low conductivity coating // *Proceedings of 15th International Heat Transfer Conference*. (2014. IHTC15-9224).
 17. Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V. et al. Heat transfer under transition and film boiling of liquids at dimpled spheres and cylinders // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 980.
 18. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Жуков В.М. и др. Способ формирования нанорельефа на теплообменной поверхности изделий. Патент RU 2517795 C1, 27.05.2014.
 19. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В. и др. Исследование различных режимов кипения на поверхности с рельефом из наночастиц // *Труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену*. 2014. С. 590–593.
 20. Жуков В.М., Елагина О.Ю., Кузма-Кичта Ю.А. и др. Интенсификация теплообмена при кипении жидкого азота с помощью нанесения субмикронных керамических покрытий на поверхности тел из сплава алюминия // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 12. С. 553–559.
 21. Жуков В.М., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. и др. Исследование теплообмена при кипении азота и фреона 113 на сфере с покрытием на основе Al_2O_3 , полученным микродуговым оксидированием // *Тепловые процессы в технике*. 2016. Т. 8. № 8. С. 353–361.
 22. Жуков В.М., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. и др. Интенсификация теплообмена при кипении различных жидкостей на сферах с покрытием, сформированным методом микро дугового оксидирования // *Тепловые процессы в технике*. 2017. Т. 9. № 12. С. 537–543.
 23. Белов К.И., Жуков В.М., Кузма-Кичта Ю.А. и др. Интенсификация теплообмена при кипении жидкостей на сферах с керамическими субмикронными покрытиями на основе Al_2O_3 // *Труды XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках»*. 2015. С. 290–293.
 24. Белов К.И., Жуков В.М., Ленков В.А. Использование керамического покрытия, полученного на основе микродугового оксидирования (МДО), на поверхности цилиндра из сплава алюминия для интенсификации теплообмена при кипении фреона-R113 // *Труды XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках»*. 2017. Т. 2. С. 284–287.

References

1. Kuzma-Kichta YuA. *Study of heat removal intensification and development of recommendations for calculating thermal-hydraulic characteristics in pre-crisis and post-crisis areas of steam-generating channels*. PhD. thesis. Moscow: MEI; 1989. (In Russ.).
2. Dedov AV. A Review of Modern Methods for Enhancing Nucleate Boiling Heat Transfer. *Thermal Engineering*. 2019;66(12):881–915.
3. Liang G, Mudawar I. Review of pool boiling enhancement by surface modification. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2019;128:892–933.
4. Volodin OA, Pecherkin NI, Pavlenko AN. Heat Transfer Enhancement at Boiling and Evaporation of Liquids on Modified Surfaces—A Review. *High Temperature*. 2021; 59(2):405–432.
5. Wang XS, Wang ZB, Chen QZ. Research on manufacturing technology and heat transfer characteristics of sintered porous surface tubes. *Adv. Mater. Res*. 2010; 97–101:1161–1165.
6. Jun S, Wi H, Gurung A. Pool boiling heat transfer enhancement of water using brazed copper microporous coatings. *Journal of Heat Transfer*. 2016;138(7). DOI: 10.1115/1.4032988
7. Kiknadze GI, Krasnov YuK, Podymaka NF. Self-organization of vortex structures during water flow around a hemispherical hole. *Reports of the Academy of Sciences*. 1986;291(6):1315–1318. (In Russ.).

8. Shchukin AV, Kozlov AP, Agachev RS. *Intensification of heat exchange by spherical recesses under the influence of disturbing factors*. Kazan: KSTU, 2003. 142 p. (In Russ.).
9. Dzyubenko BV, Kuzma-Kichta YuA, Leontyev AI. *Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro- and nanoscales*. Moscow: FSUE "TsNIIATOMINFORM", 2008. 532 p. (In Russ.).
10. Kiknadze GI, Kryuchkov II, Chushkin YuV. *Heat transfer crisis during self-organization of tornado-like vortex structures*: Preprint IAE No. 4841/3. Moscow: TsNIIatominform, 1989. (In Russ.).
11. Mostinskii IL, Geshele VD, Goryainov DA. Critical heat flux and heat transfer in the postcrisis region on surfaces with craters. *Thermal engineering*. 2003;50(10):838–843.
12. Kim SJ, Bang IC, Buongiorno J. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(19):4105–4116. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002
13. Kim HD, Kim MH. Effect of nanoparticle deposition on capillary wicking that influences the critical heat flux in nanofluids. *Applied Physics Letters*. 2007;91. DOI: 10.1063/1.2754644
14. Vasil'ev NV, Varaksin AYU, Zeigarnik YuA. Characteristics of subcooled water boiling on structured surfaces. *High Temperature*. 2017;55(6):880–886.
15. Kuznetsov D, Pavlenko A. Heat transfer during nitrogen boiling on surfaces modified by microarc oxidation. *Energies*. 2022;15(16). DOI: 10.3390/en15165792
16. Zhukov VM, Kuzma-Kichta YuA, Lenkov V. Enhancement of heat transfer at transition and film boiling of nitrogen on spheres with dimples and low conductivity coating. *15th International Heat Transfer Conference*. (2014. IHTC15-9224).
17. Zhukov VM, Kuzma-Kichta YuA, Lavrikov AV et al. Heat transfer under transition and film boiling of liquids at dimpled spheres and cylinders. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;980.
18. Kuzma-Kichta YuA, Lavrikov AV, Zhukov VM et al. *Method for obtaining of nanorelief on surface*. Patent RU 2517795 C1, 05.27.2014. (In Russ.).
19. Kuzma-Kichta YuA, Lavrikov AV, Shustov MV et al. Study of various boiling regimes on a surface with a relief of nanoparticles. *The Sixth Russian National Conference on Heat Transfer*. (2014). p. 590–593. (In Russ.).
20. Zhukov VM, Elagina OYu, Kuzma-Kichta YuA et al. Intensification of heat transfer during boiling of liquid nitrogen by applying submicron ceramic coatings on the surfaces of aluminum alloy bodies. *Thermal processes in engineering*. 2014;6(12):553–559. (In Russ.).
21. Zhukov VM, Kuzma-Kichta YuA, Lavrikov AV et al. Study of heat transfer during boiling of nitrogen and freon 113 on a sphere with a coating based on Al_2O_3 obtained by microarc oxidation. *Thermal processes in engineering*. 2016;8(8):353–361. (In Russ.).
22. Zhukov VM, Kuzma-Kichta YuA, Lavrikov AV et al. Intensification of heat transfer during boiling of various liquids on spheres with a coating formed by the micro arc oxidation method. *Thermal processes in engineering*. 2017;9(12):537–543. (In Russ.).
23. Belov KI, Zhukov VM, Kuzma-Kichta YuA et al. Intensification of heat transfer during boiling of liquids on spheres with ceramic submicron coatings based on Al_2O_3 . *The XX School-seminar of young scientists and specialists led by Academician of the Russian Academy of Sciences A.I. Leont'ev «Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants»*. 2015:290–293. (In Russ.).
24. Belov KI, Zhukov VM, Lenkov VA. The use of a ceramic coating obtained on the basis of microarc oxidation (MDO) on the surface of an aluminum alloy cylinder to intensify heat transfer during boiling of freon-R113. *The XXI School-seminar of Young Scientists and specialists led by Academician of the Russian Academy of Sciences A.I. Leont'ev «Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants»*. 2017;2:284–287. (In Russ.).