

Экспериментальное исследование кипения чистого и загрязненного гидрофторэфира в области низких тепловых потоков

© Н.В. Кукшинов, В.Е. Евстигнеева, Т.И. Молчанов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Представлены результаты экспериментального исследования кипения в большом объеме чистого и загрязненного гидрофторэфира HFE-7100 на цилиндрической поверхности диаметром 3 мм. Эксперименты проведены при атмосферном давлении при плотности теплового потока в диапазоне от 1 до 58 кВт/м². Построены зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для двух теплоносителей в случаях увеличения и уменьшения тепловой нагрузки. Показано, что загрязнение теплоносителя приводит к ухудшению теплоотдачи. Проведено сравнение результатов с известными зависимостями, связывающими коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока. Выявлено, что наилучшее согласование с экспериментом обеспечивает модель Мак-Нелли. Выполнена оптимизация эмпирических констант моделей для чистого HFE-7100. На основе полученных результатов обоснована необходимость экспериментального определения изменившихся теплофизических характеристик загрязненного HFE-7100 для корректного расчета и проектирования двухфазных систем охлаждения.

Ключевые слова: пузырьковое кипение, загрязненный теплоноситель, гидрофторэфир HFE-7100, естественная конвекция, кипение на цилиндрической поверхности

Введение. В связи с увеличением плотности теплового потока в современных технических системах, например в силовой и вычислительной электронике, требуется создавать системы охлаждения, рассчитанные на отвод тепловых потоков около 100 Вт/см² в стационарном режиме работы системы и тепловых потоков порядка 1000 Вт/см² при нестационарных (пиковых по тепловой мощности) режимах [1]. В таких условиях применение однофазной вынужденной конвекции ограничено низкой эффективностью теплоотдачи [1, 2]. В качестве альтернативного метода охлаждения рассматривается кипение в большом объеме [2]. В последние годы активно исследуются системы двухфазного охлаждения для центров обработки данных; результаты расчетных и экспериментальных работ свидетельствуют о практической реализуемости такого подхода [3].

Среди диэлектрических жидкостей, используемых для двухфазного охлаждения, распространение получил гидрофторэфир HFE-7100. Температура насыщения, составляющая 61 °С, лежит ниже верхнего предела рабочего диапазона большинства компонентов микроэлектроники, что позволяет избегать перегрева элементов. В работе [4] представлены теплофизические свойства этого теплоносителя, которые

могут быть использованы для расчетного определения характеристик кипения.

Многие современные работы, посвященные кипению HFE-7100, направлены на исследование интенсификации теплоотдачи. В работе [5] экспериментально показано, что микропористые медные покрытия увеличивают число активных центров парообразования более чем в 2 раза по сравнению с гладкой медной поверхностью. Такая модификация поверхности обеспечивает снижение порогового перегрева для начала кипения с 17...38 °С (что характерно для гладкой медной поверхности) до 3...11 °С.

На примере теплоносителя HFE-7000 в [6] исследовано влияние шероховатости и угла наклона поверхности на критический тепловой поток и начало кипения. Увеличение шероховатости от 0,039 до 1,44 мкм привело к повышению коэффициента теплоотдачи в области развитого кипения на 30...40 %. Обзорная работа [7] показала, что микро- и наноструктурированные поверхности позволяют достигать критических тепловых потоков 150...200 Вт/см² для диэлектрических жидкостей, причем наиболее эффективными оказались капиллярно-пористые покрытия и структуры с регулярным микрорельефом.

Экспериментальные исследования кипения HFE-7100 в горизонтальных слоях на плоскости при давлении от 50 до 150 кПа исследованы в работе [8]. При этом повышение давления насыщения сопровождается ростом плотности центров парообразования и увеличением коэффициента теплоотдачи в 1,5–2,0 раза. В продолжение этих исследований в [9] показано, что нанесение капиллярно-пористых покрытий на поверхность нагрева обеспечивает снижение перегрева в точке начала кипения и увеличение критического теплового потока на 60...80 % за счет капиллярного подвода жидкости к зоне испарения. Для течений в микроканалах с реберными структурами [10] экспериментально установлено, что коэффициент теплоотдачи достигает 80 кВт/(м² · К) при плотности теплового потока выше 50 Вт/см², что значительно превосходит значения для гладких каналов.

Для прогнозирования теплоотдачи при пузырьковом кипении применяется широкий спектр полуэмпирических корреляций. Для плоских поверхностей базовыми являются модель Розенхау [11], использующая коэффициент C_{sf} для учета взаимодействия в системе «жидкость—поверхность», и модель Форстера — Зубера [12], базирующаяся на динамике пузырей. Высокую точность для различных сред демонстрирует корреляция Лабунцова [13]. Модели Мостински [14] и Купера [15] опираются на закон соответственных состояний и приведенное давление, причем Купер дополнительно учитывает молекулярную массу и шероховатость. Модель Гогонина [16] обобщает данные в широком диапазоне условий, в явном виде учитывая влияние теплофизических свойств стенки и ее микрорельефа. Специально для

диэлектрических жидкостей (включая HFE-7100) в тонких слоях рекомендована зависимость Пьюро с подбираемыми эмпирическими коэффициентами [8, 17]. Механизм испарения на границах центров парообразования и физика кризиса кипения лежат в основе модели Ягова [18].

Расчет теплообмена на горизонтальных трубах представлен гидродинамической моделью Кружилина [19] и корреляцией Мак-Нелли [20], учитывающей параметры отрыва пузырей и свойства жидкости. Модель Горенфло [21] обеспечивает точность порядка 14 % за счет использования эталонных значений коэффициента теплоотдачи. Конвективные модели Тухами [22] и Корнвелла — Хьюстона [23] позволяют рассчитывать кипение широкого круга органических веществ и хладагентов на цилиндрических поверхностях.

Большинство из перечисленных исследований выполнено с чистыми образцами теплоносителя. В условиях эксплуатации гидрофторэфира HFE-7100 в течение длительного времени контактирует с полимерными материалами (уплотнители, трубки, клеевые соединения), что приводит к вымыванию органических соединений, в том числе фталатов и веществ с метиленовыми группами [24]. Накопление таких примесей изменяет вязкость, поверхностное натяжение и температуру насыщения жидкости. Данные по влиянию загрязнения в процессе эксплуатации на характеристики кипения гидрофторэфиров в литературе не представлены.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение влияния загрязнения HFE-7100 на коэффициент теплоотдачи при кипении теплоносителей на цилиндрической поверхности диаметром 3 мм. Дополнительной задачей является оценка применимости существующих полуэмпирических корреляций для расчета теплоотдачи чистого и загрязненного теплоносителя. Расчет коэффициентов теплоотдачи проводился с использованием теплофизических свойств HFE-7100 из работ [4, 25], а оценка точности каждой модели выполнялась по критерию среднеквадратичного отклонения (СКО).

Экспериментальная установка и методы исследования. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Установка представляет собой герметичный сосуд, в котором размещается стальной экспериментальный образец цилиндрической формы диаметром 3 мм. С помощью лабораторного автоматического трансформатора (ЛАТР) через токопроводы к образцу подводится электрический ток. Для поддержания теплоносителя при температуре насыщения в емкости находится дополнительный трубчатый электронагреватель (ТЭН), отделенный экраном от объекта исследования, для того чтобы процесс кипения на нем не влиял на прохождение исследования. Контроль температуры насыщения выполняется погружной термпарой, а давление в емкости определяется манометром. Пар в процессе

эксперимента поднимается в конденсатор и, перейдя в жидкое состояние, возвращается в нижнюю часть емкости. Для определения температуры стенки внутри экспериментального образца находятся две термопары.

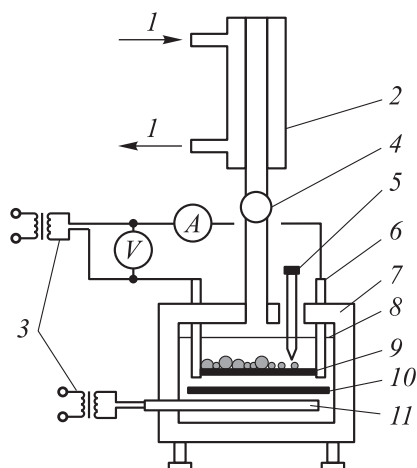


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — охлаждающая вода; 2 — конденсатор; 3 — ЛАТР; 4 — манометр; 5 — термопара; 6 — токопровод; 7 — герметичная емкость; 8 — уровень жидкости; 9 — экспериментальный образец; 10 — экран; 11 — ТЭН

В процессе проведения эксперимента цилиндр нагревался до температуры насыщения за счет теплопроводности от нагретого теплоносителя, затем с помощью ЛАТР варьировалась подводимая к экспериментальному образцу мощность сначала с увеличением нагрузки («вверх»), а затем с ее уменьшением («вниз»). При этом проводились записи показаний вольтметра и амперметра. Показания термопар, измеряющих температуру стенки образца, собирались с помощью аналого-цифрового преобразователя L-Card.

Экспериментальные исследования проводились для чистого и загрязненного HFE-7100 при давлении 1 бар. Плотность теплового потока варьировалась от 1 до 58,1 кВт/м². Данный диапазон покрывает область перехода от свободной конвекции к пузырьковому кипению и область пузырькового кипения со сравнительно малым количеством центров парообразования, что представляло интерес в данном исследовании.

Часть полуэмпирических моделей для описания характеристик кипения, представленных в работах [11–23], не подходит для сравнения с полученными в настоящей статье экспериментальными данными, поскольку параметры, входящие в некоторые из них, в ходе экспериментов не определялись, например, шероховатость. Те зависимости, которые в полной мере могли быть использованы, представлены

в табл. 1. Были приняты следующие обозначения: α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); q — тепловой поток, Вт/м²; $\Delta T = T_w - T_{sat}$ — перегрев стенки, К; h_{LG} — удельная теплота парообразования, Дж/кг; C_{sf} — эмпирический коэффициент в моделях Розенхау и Пьюро, безразмерный; p_{cr} — критическое давление, принятое равным 2,23 МПа; μ_L — динамическая вязкость жидкости, Па·с; σ — поверхностное натяжение, Н/м; g — ускорение свободного падения, м/с²; ρ_L — плотность жидкости, кг/м³; ρ_V — плотность пара, кг/м³; λ_L — теплопроводность жидкости, Вт/(м·К); p — давление системы, Па; T_{sat} — температура насыщения жидкости, К; $p_r = p / p_{cr}$ — приведенное давление, безразмерное; c_{pL} — изобарная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); $l_{\sigma} = \sqrt{\sigma / (g(\rho_L - \rho_V))}$ — капиллярная постоянная, м; ν_L — кинематическая вязкость жидкости, м²/с; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); D — диаметр трубы, м; $Pr_L = \mu_L c_{pL} / \lambda_L$ — число Прандтля жидкости, безразмерное.

Таблица 1

Зависимости для коэффициента теплоотдачи

Модель, источник	Зависимость
Розенхау [11]	$\alpha = \frac{q}{\Delta T}, \text{ где } \Delta T = \frac{h_{LG}}{c_{pL}} C_{sf} \left(\frac{q}{\mu_L h_{LG}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}} \right)^{0,33} \left(\frac{c_{pL} \mu_L}{\lambda_L} \right)^{1,7}$
Форстер — Зубер [12]	$\alpha = \frac{q}{\Delta T}, \text{ где } \alpha = 0,00122 \frac{\lambda_L^{0,79} c_{pL}^{0,45} \rho_L^{0,49}}{\sigma^{0,5} \mu_L^{0,29} h_{LG}^{0,24} \rho_V^{0,24}} \cdot \Delta T^{0,24} \cdot \Delta P^{0,75}$
Лабунцов [13]	$\alpha = 0,075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{\lambda_L^2}{\nu_L \sigma T_{sat}} \right)^{1/3} q^{2/3}$
Мостински [14]	$\alpha = 3,596 \cdot 10^{-5} \cdot p_{cr}^{0,69} \cdot q^{0,7} \cdot (1,8 p_r^{0,17} + 4 p_r^{1,2} + 10 p_r^{10})$
Пьюро [17]	$\alpha = C_{sf} \frac{\lambda_L}{l_{\sigma}} \left[\frac{q}{h_{LG} \rho_V^{0,5} (\sigma g (\rho_L - \rho_V))^{0,25}} \right]^{2/3} \left(\frac{c_{pL} \mu_L}{\lambda_L} \right)^m$

Модель, источник	Зависимость
Ягов [18]	$\alpha = \frac{q}{\Delta T}, \text{ где } q = 3,43 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda_L^2}{\nu_L \sigma T_{sat}} \Delta T^3 \left(1 + \frac{h_{LG} \Delta T}{2RT_{sat}^2} \right) \times$ $\times \left(1 + \sqrt{1 + 800 \frac{h_{LG} (\rho_V \nu_L)^{3/2}}{\sigma (\lambda_L T_{sat})^{1/2}}} + 400 \frac{h_{LG} (\rho_V \nu_L)^{3/2}}{\sigma (\lambda_L T_{sat})^{1/2}} \right)$
Кружилин [19]	$\alpha = 0,082 \frac{\lambda_L}{l_\sigma} \text{Re}_b^{0,7} K_2^{0,33} \text{Pr}_L^{-0,45}, \text{ где}$ $\text{Re}_b = \frac{h_{LG} q}{g T_{sat} \lambda_L} \cdot \frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}; K_2 = \frac{T_{sat} c_{pL} \sigma \rho_L}{h_{LG}^2 \rho_V^2 l_\sigma}.$
Мак-Нелли [20]	$\alpha = 0,225 \left(\frac{q c_{pL}}{h_{LG}} \right)^{0,69} \left(\frac{p \lambda_L}{\sigma} \right)^{0,31} \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} - 1 \right)^{0,32}$
Корнвелл — Хьюстон [23]	$\alpha = 9,7 p_{cr}^{0,5} \cdot \left(\frac{qD}{h_{LG} \mu_L} \right)^{0,67} \cdot \text{Pr}_L^{0,4} \cdot \frac{\lambda_L}{D} \cdot (1,8 p_r^{0,17} + 4 p_r^{1,2} + 10 p_r^{10})$

Все зависимости, приведенные в табл. 1, являются функциями не только режимных параметров, но и теплофизических свойств теплоносителя. Свойства теплоносителя HFE-7100 [25], используемые для расчета коэффициента теплоотдачи по зависимостям из табл. 1, представлены ниже:

Температура насыщения жидкости T_{sat} , К	334
Кинематическая вязкость жидкости ν_L , мм ² /с	0,3008
Поверхностное натяжение σ , Н/м	$1,36 \cdot 10^{-2}$
Удельная теплота парообразования h_{LG} , кДж/кг	112
Плотность жидкости ρ_L , кг/м ³	1419
Теплопроводность жидкости λ_L , Вт/(м·К)	0,068
Изобарная теплоемкость жидкости c_{pL} , Дж/(кг·К)	1170
Плотность пара ρ_V , кг/м ³	9,4

Результаты экспериментального исследования и их обсуждение. Зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, полученные по результатам экспериментальных исследований, приведены на рис. 2. Из анализа кривых, показанных на рисунке, следует, что при увеличении тепловой нагрузки сначала реализуется режим естественной конвекции, при этом перегрев стенки может достигать 22 °С, что характерно для гидрофторэфинов [5].

После режима естественной конвекции происходит начало кипения, при котором на цилиндрической поверхности лавинообразно становятся активными центры парообразования, и температура стенки скачкообразно снижается на $\approx 15^\circ\text{C}$. Изменение температуры стенки при переходе от режима естественной конвекции к режиму пузырькового кипения показано на рис. 3.

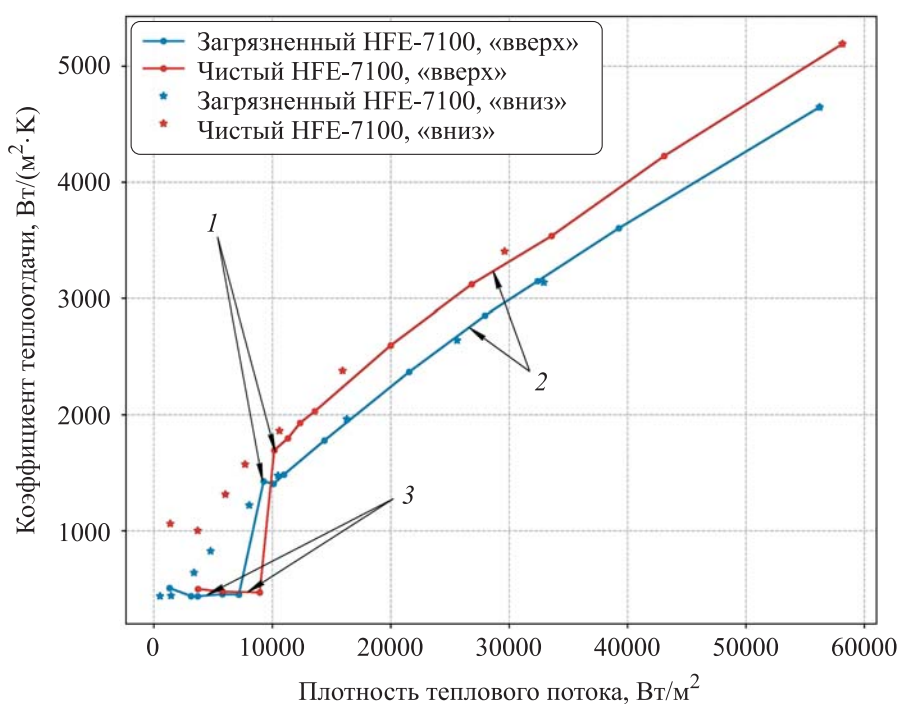


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для чистого и загрязненного HFE-7100:

1 — начало кипения; 2 — пузырьковое кипение; 3 — естественная конвекция; «вверх» — проход по тепловой нагрузке от меньшего к большему; «вниз» — проход по тепловой нагрузке от большего к меньшему

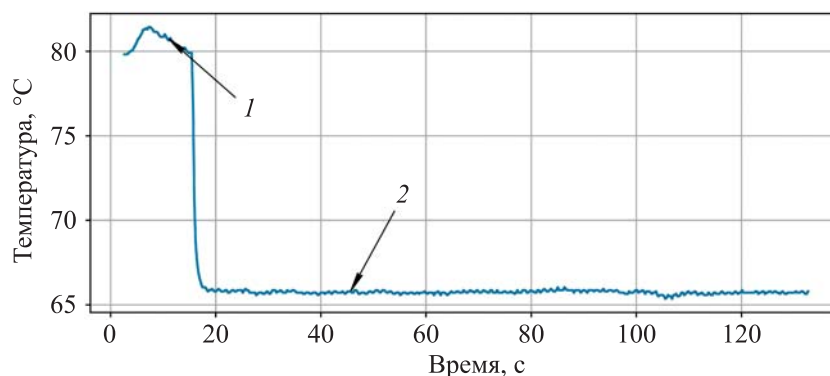


Рис. 3. Температура стенки при начале кипения загрязненного HFE-7100:

1 — естественная конвекция; 2 — пузырьковое кипение

Необходимо отметить, что для загрязненного образца HFE-7100 теплоотдача ухудшается (см. рис. 2). При увеличении тепловой нагрузки в процессе эксперимента в среднем коэффициент теплоотдачи чистого HFE-7100 выше на 11 %, а при уменьшении тепловой нагрузки — на 18 %. Тенденция уменьшения коэффициента теплоотдачи при кипении загрязненного HFE-7100 в области режимов устойчивого пузырькового кипения сохранялась при проведении серии экспериментов — по пять для каждого из образцов жидкости.

Далее проведен анализ ветвей «вниз», которые соответствуют убыванию тепловой нагрузки, поскольку на них реализованы режимы устойчивого пузырькового кипения вплоть до перегревов около 1–2 °С. Кривые кипения для убывающих ветвей приведены на рис. 4.

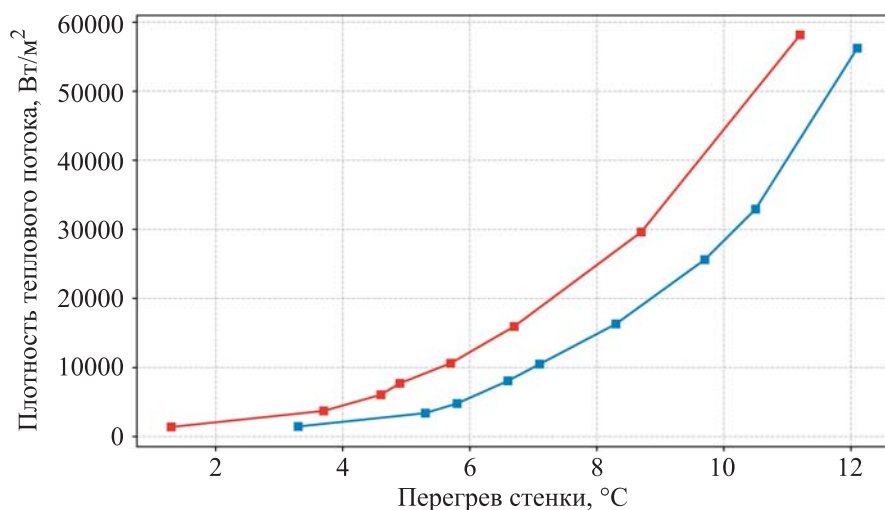


Рис. 4. Кривая кипения для чистого (—■—) и загрязненного (—■—) HFE-7100

По приведенным в табл. 1 формулам были построены зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока с использованием свойств теплоносителя HFE-7100, при этом взяты оригинальные эмпирические коэффициенты. Для сравнения на рис. 5 представлены зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока и экспериментальные данные для чистого и загрязненного HFE-7100.

Лучшее совпадение с экспериментальными данными для чистого HFE-710 продемонстрировала корреляция Мак-Нелли [20], что отражает СКО, равное 7,7 %. Это объясняется тем, что данная зависимость получена на основе обобщения данных для кипения не только на плоскости в широком диапазоне давлений, но и на латунной горизонтальной трубке. При этом коэффициенты в обобщенной корреляции подбирались с помощью регрессионного анализа для экспериментов

с теплоносителями и с высоким поверхностным натяжением, например водой, и с относительно низким поверхностным натяжением (низкокипящие алифатические углеводороды).

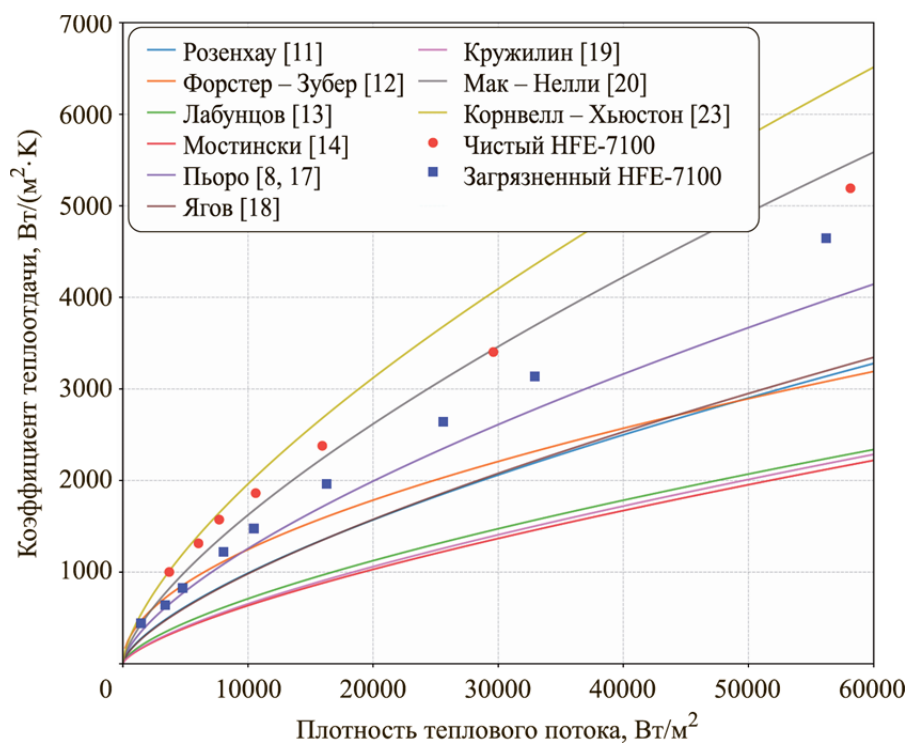


Рис. 5. Зависимости коэффициента теплоотдачи для чистого и загрязненного HFE-7100

Второй по точности является корреляция Корнвелла — Хьюстона [23] с величиной СКО 22,2 % от экспериментальных данных, полученных при кипении чистого образца. Это объясняется тем, что корреляция изначально создана для кипения на цилиндрических поверхностях и в ней учтен конвективный вклад от паровых пузырей, скользящих по образующей цилиндра. Однако, поскольку это единственная зависимость из представленных, предсказывающая завышенные значения коэффициента теплоотдачи по сравнению с теми, что получены в эксперименте, можно предположить, что интенсификация теплоотдачи за счет скользящих пузырей по горизонтальной трубе в полной мере реализуется на трубах большего диаметра. На исследуемом малом цилиндре диаметром 3 мм длина пути скопления пузыря до момента его отрыва в верхнюю зону мала, вследствие чего гидродинамический вклад скользящих пузырей оказывается меньше, чем предсказывает модель Корнвелла — Хьюстона [23].

Для зависимостей Форстера — Зубера [12], Ягова [18], Розенхау [11], Лабунцова [13], Кружилина [19], Мостинского [14] и Пьюро [17] с коэффициентами из работы [8] среднеквадратичное отклонение от экспериментальных данных составило 42,1 %, 46,0 %, 46,7 %, 66,1 %, 68,3 %, 69,6 % и 28,6 % соответственно. При этом все зависимости занижают коэффициент теплоотдачи. Модель Форстера — Зубера [12], базирующаяся на радиальной скорости роста пузыря, разрабатывалась на основе экспериментальных данных пузырькового кипения воды, этанола, бутана и ртути в широком диапазоне давлений преимущественно на плоских нагревателях. Уравнение Ягова [18] разрабатывалось для обобщения теплоотдачи при кипении воды, хладагентов и криогенных жидкостей от глубокого вакуума до околокритических давлений, однако валидировалось на плоских поверхностях и трубах большого диаметра. Модель Розенхау [11], использующая допущение о пристенной микроконвекции, базируется на экспериментах с водой, спиртами и бензолом на платиновых, медных и стальных плоских поверхностях или тонких проволоках при атмосферном давлении.

Зависимости Лабунцова [13] и Кружилина [19] получены на основе теории подобия для кипения воды и органических жидкостей на пластинах и крупногабаритных трубах при умеренных и высоких давлениях. Термодинамическая модель Мостинского [14] опирается на закон соответственных состояний и критические параметры воды и углеводородов. Уравнение Пьюро [17] с подобранными коэффициентами [8] обобщает данные по кипению HFE-7100 в тонких горизонтальных слоях жидкости на плоской поверхности из нержавеющей стали. Следовательно, перечисленные зависимости не в полной мере учитывают совокупность физических и геометрических факторов, исследуемых в текущей работе.

Жидкость HFE-7100 обладает низким поверхностным натяжением и малой теплотой парообразования. В условиях кипения на криволинейной поверхности трубки малого диаметра (3 мм) уменьшение капиллярного масштаба приводит к формированию пузырей с малыми отрывными диаметрами и высокой частотой их генерации. На радиусе кривизны 1,5 мм это вызывает активацию центров парообразования во впадинах шероховатости. Исходные расчетные зависимости, экстраполирующие масштабы отрывных диаметров и плотности центров кипения со свойств воды или органических сред на плоских или цилиндрических поверхностях, недооценивают плотность центров парообразования HFE-7100 и интенсивность турбулизации пристенного слоя жидкости, что и выражается в занижении коэффициента теплоотдачи.

После подбора оптимальных эмпирических констант таким образом, чтобы СКО от экспериментальных данных для чистого образца HFE-7100 было минимальным, удалось снизить погрешность моделей, что отражено на рис. 6.

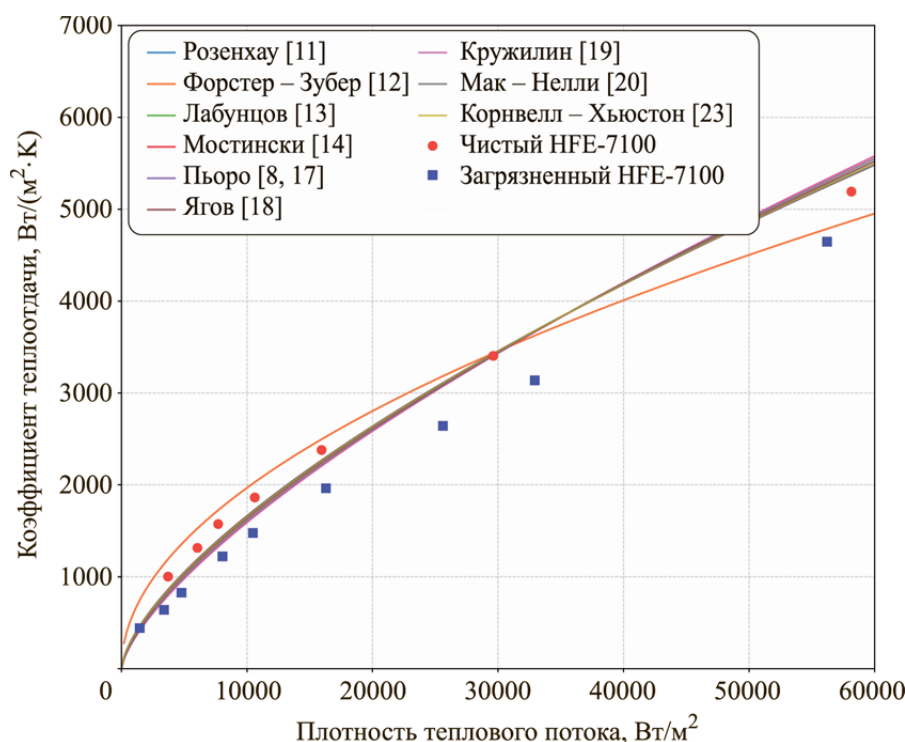


Рис. 6. Зависимости оптимальных коэффициентов для чистого и загрязненного HFE-7100

Подобранные коэффициенты и СКО для всех моделей представлены в табл. 2, из данных которой следует, что СКО для всех корреляций с оптимальными подобранными коэффициентами не превышает 8,4 %.

При переходе к анализу экспериментальных данных для образца HFE-7100, подвергшегося загрязнению и деградации в ходе эксплуатации, характер аппроксимации качественно меняется, демонстрируя рост погрешности расчетных моделей. Например, исходное значение СКО составило 19,4 % для модели Мак-Нелли и 44,8 % для модели Корнвелла — Хьюстона. При наложении на этот массив данных эмпирических коэффициентов, которые были предварительно оптимизированы по данным чистого теплоносителя, остаточное среднеквадратичное отклонение составило 25,4 % для уравнения Форстера — Зубера и в диапазоне 18,4...19,0 % для остальных моделей. Эта погрешность обусловлена тем, что масштабные константы подобраны по эксперименту с чистым теплоносителем.

Подобранные коэффициенты для корреляций

Модель	Коэффициент		СКО, %
	исходный	оптимальный	
Розенхау [11]	0,006	0,0036	6,0
Форстер — Зубер [12]	0,00122	0,0031	7,9
Лабунцов [13]	0,075	0,1759	5,7
Мостински [14]	$3,596 \cdot 10^{-5}$	$9,037 \cdot 10^{-5}$	8,4
Пьоро [8, 17]	20445; –1,9	27051; –1,9	5,7
Ягов [18]	0,000343	0,001685	6,7
Кружилин [19]	0,082	0,2	8,4
Мак-Нелли [20]	0,225	0,2236	7,6
Корнвелл — Хьюстон [23]	9,7	8,179	6,0

Проведение оптимизации коэффициентов непосредственно под загрязненный образец методологически неоправданно, поскольку математическая структура всех рассматриваемых полуэмпирических моделей явным образом включает в себя фундаментальные теплофизические характеристики теплоносителя, которые напрямую определяют интенсивность теплоотдачи. Несоответствие заложенных в модели паспортных свойств реальному состоянию загрязненного HFE-7100 и определяет систематическую погрешность всех зависимостей.

Заключение. Проведенные эксперименты по кипению чистого и загрязненного HFE-7100 на цилиндрической поверхности диаметром 3 мм показали, что длительная эксплуатация теплоносителя HFE-7100 и, как следствие, его загрязнение ухудшают теплоотдачу от 11 до 18 %. В момент перехода от естественной конвекции к развитому пузырьковому кипению наблюдается скачкообразное уменьшение температуры стенки на 15 °С. Сопоставление опытных данных с исходными теоретическими моделями выявило, что наилучшую прогнозную способность для чистого HFE-7100 демонстрирует корреляция Мак-Нелли с СКО 7,7 %. Модель Корнвелла — Хьюстона показала ошибку 22,2 %, являясь единственной моделью, систематически завышающей значения коэффициента теплоотдачи из-за избыточного учета вклада скользящих пузырей для геометрии малого диаметра. Остальные зависимости (Форстера — Зубера, Ягова, Розенхау, Лабунцова, Кружилина, Мостинского и Пьоро), разработанные преимущественно для плоских поверхностей, в оригинальном виде демонстрируют погрешность в сторону занижения результатов в диапазоне от 42,1 до 69,6 %. Оптимизация эмпирических констант по массиву данных для чистого вещества позволила понизить СКО всех девяти корреляций на

уровне ниже 8,4 %. Вместе с тем перенос данных оптимизированных параметров на массив загрязненного HFE-7100 приводит к остаточной погрешности в диапазоне 18,4...25,4 %. Полученные результаты указывают на необходимость экспериментального определения изменившихся свойств для загрязненного теплоносителя. Поскольку свойства теплоносителя напрямую входят в критериальные уравнения, их определение необходимо для корректного расчета теплообмена при проектировании систем охлаждения с использованием гидрофторэфира в качестве теплоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Xu T., Li Y., Chen J., Zhang H., Wang L. A brief review of two-phase thermal management strategies for high heat-flux electronics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2026, vol. 172, art. 110521.
- [2] Mahmoud M.M., Karayiannis T.G. Pool boiling review: Part I – Fundamentals of boiling and relation to surface design. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 25, art. 101024, pp. 1–19.
- [3] Liu C., Yu H. Evaluation and optimization of a two-phase liquid-immersion cooling system for data centers. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 5, art. 1395.
- [4] Rausch M.H., Kretschmer L., Will S., Leipertz A., Fröba A.P. Density, surface tension, and kinematic viscosity of hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2015, vol. 60, no. 12, pp. 3759–3765.
- [5] Thiagarajan S.J., Yang R., King C., Narumanchi S. Bubble dynamics and nucleate pool boiling heat transfer on microporous copper surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 89, pp. 1297–1315.
- [6] El-Genk M.S., Pourghasemi M. Experiments and correlations of saturation boiling of HFE-7000 dielectric liquid on rough inclined copper surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 164, art. 120540.
- [7] Sajjad U., Sadeghianjahromi A., Ali H.M., Wang C.-C. Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids – A review on surface engineering. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 195, art. 117074.
- [8] Брестер А.Е., Швецов Д.А., Жуков В.И., Павленко А.Н. Теплообмен при пузырьковом кипении в горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100 при различных давлениях. *Теплоэнергетика*, 2025, № 2, с. 30–40.
- [9] Швецов Д.А., Павленко А.Н., Назаров А.Д., Михайлов А.В., Жуков В.И. Теплообмен при кипении в тонком слое диэлектрической жидкости HFE-7100 на капиллярно-пористых покрытиях. *Теплофизика высоких температур*, 2024, т. 62, № 6, с. 865–876.
- [10] Zhuang X., Xie Y., Li X., Yue S., Wang H., Wang H., Yu P. Experimental investigation on flow boiling of HFE-7100 in a microchannel with pin fin array. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 225, art. 120180.
- [11] Rohsenow W.M. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1952, vol. 74, no. 6, pp. 969–975.
- [12] Forster H.K., Zuber N. Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer. *AIChE Journal*, 1955, vol. 1, no. 4, pp. 531–535.
- [13] Labuntsov D.A. Heat transfer problems with nucleate boiling of liquids. *Thermal Engineering*, 1972, vol. 19, no. 9, pp. 21–28.

- [14] Mostinski I.L. Application of the rule of corresponding states for calculation of heat transfer and critical heat flux. *Teploenergetika*, 1963, vol. 4, no. 4, pp. 66–71.
- [15] Cooper M.G. Saturation nucleate pool boiling – a simple correlation. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, 1984, vol. 86, no. 2, pp. 785–793.
- [16] Gogonin I.I. The dependence of boiling heat transfer on the properties and geometric parameters of heat-transfer wall. *High Temperature*, 2006, vol. 44, no. 6, pp. 913–921.
- [17] Pioro I.L. Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42, no. 11, pp. 2003–2013.
- [18] Ягов В.В. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей. *Теплоэнергетика*, 1988, № 2, с. 4–9.
- [19] Kruzhilin G.N. Free-convection transfer of heat from a horizontal plate and boiling liquid. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1947, vol. 58, no. 8, pp. 1657–1660.
- [20] McNelly M.J. A correlation of rates of heat transfer to nucleate boiling of liquids. *Journal of the Imperial College Chemical Engineering Society*, 1953, vol. 7, pp. 18–34.
- [21] Gorenflo D. Pool Boiling. *VDI-Heat Atlas*. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993, Sect. Ha.
- [22] Touhami B., Abdelkader A., Mohamed T. Proposal for a correlation raising the impact of the external diameter of a horizontal tube during pool boiling. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, vol. 84, pp. 293–299.
- [23] Cornwell K., Houston S.D. Nucleate pool boiling on horizontal tubes: a convection-based correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, vol. 37, suppl. 1, pp. 303–309.
- [24] Молчанов Т.И., Кукишинов Н.В. Исследование вязкости и состава гидрофторэфира различной степени загрязнения. *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2026, т. 69, № 1, с. 37–43.
- [25] Pranoto I., Rahman M.A., Waluyo J. The Role of Pin Fin Array Configurations and Bubble Characteristics on the Pool Boiling Heat Transfer Enhancement. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 7, p. 232.

Статья поступила в редакцию 22.07.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кукишинов Н.В., Евстигнеева В.Е., Молчанов Т.И. Экспериментальное исследование кипения чистого и загрязненного гидрофторэфира в области низких тепловых потоков. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 9. EDN DHBVfy

Кукишинов Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kukshinov@bmstu.ru

Евстигнеева Варвара Евгеньевна — ассистент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: yevstigneeva@bmstu.ru

Молчанов Тимофей Игоревич — старший преподаватель кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: molchanovti@bmstu.ru

Experimental Study of Boiling of Pure and Contaminated Hydrofluoroether at Low Heat Fluxes

© N.V. Kukshinov, V.E. Evstigneeva, T.I. Molchanov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The results of an experimental study of pool boiling of pure and contaminated hydrofluoroether HFE-7100 on a cylindrical surface of 3 mm in diameter are presented. The experiments were carried out at atmospheric pressure over a heat flux density range of 1 to 58 kW/m². The dependencies of the heat transfer coefficient on the heat flux were established for both fluids under conditions of both increasing and decreasing thermal loads. It is shown that fluid contamination leads to a degradation in heat transfer performance. The experimental data were compared with well-known correlations relating the heat transfer coefficient to the heat flux, with the McNelly model providing the best agreement with the experiment. Furthermore, the empirical constants of the predictive models were optimized for the pure HFE-7100 data. Based on the findings, the necessity of experimentally determining the altered thermophysical properties of the contaminated HFE-7100 is justified to ensure the accurate calculation and design of two-phase cooling systems.

Keywords: nucleate boiling, coolant contamination, boiling curve, boiling shock wave, hydrofluoroether HFE-7100

REFERENCES

- [1] Xu T., Li Y., Chen J., Zhang H., Wang L. A brief review of two-phase thermal management strategies for high heat-flux electronics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2026, vol. 172, art. 110521.
- [2] Mahmoud M.M., Karayiannis T.G. Pool boiling review: Part I – Fundamentals of boiling and relation to surface design. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, vol. 25, art. 101024, pp. 1–19.
- [3] Liu C., Yu H. Evaluation and optimization of a two-phase liquid-immersion cooling system for data centers. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 5, art. 1395.
- [4] Rausch M.H., Kretschmer L., Will S., Leipertz A., Fröba A.P. Density, surface tension, and kinematic viscosity of hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2015, vol. 60, no. 12, pp. 3759–3765.
- [5] Thiagarajan S.J., Yang R., King C., Narumanchi S. Bubble dynamics and nucleate pool boiling heat transfer on microporous copper surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 89, pp. 1297–1315.
- [6] El-Genk M.S., Pourghasemi M. Experiments and correlations of saturation boiling of HFE-7000 dielectric liquid on rough inclined copper surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 164, art. 120540.
- [7] Sajjad U., Sadeghianjahromi A., Ali H.M., Wang C.-C. Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids – A review on surface engineering. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 195, art. 117074.
- [8] Brester A.E., Shvetsov D.A., Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Teploobmen pri puzyrkovom kipenii v gorizontalnykh sloyakh dielectricheskoy zhidkosti HFE-7100 pri razlichnykh davleniyakh [Heat transfer during nucleate boiling of dielectric liquid HFE-7100 in horizontal layers at various pressures]. *Teploenergetika — Thermal Engineering*, 2025, no. 2, pp. 30–40.
- [9] Shvetsov D.A., Pavlenko A.N., Nazarov A.D., Mikhaylov A.V., Zhukov V.I. Teploobmen pri kipenii v tonkom sloe dielectricheskoy zhidkosti HFE-7100 na kapillyarno-poristykh pokrytiyakh [Heat transfer during boiling in a thin layer of

- dielectric liquid HFE-7100 on capillary-porous coatings]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2024, vol. 62, no. 6, pp. 865–876.
- [10] Zhuang X., Xie Y., Li X., Yue S., Wang H., Wang H., Yu P. Experimental investigation on flow boiling of HFE-7100 in a microchannel with pin fin array. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 225, art. no. 120180.
- [11] Rohsenow W.M. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1952, vol. 74, no. 6, pp. 969–975.
- [12] Forster H.K., Zuber N. Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer. *AIChE Journal*, 1955, vol. 1, no. 4, pp. 531–535.
- [13] Labuntsov D.A. Heat transfer problems with nucleate boiling of liquids. *Thermal Engineering*, 1972, vol. 19, no. 9, pp. 21–28.
- [14] Mostinski I.L. Application of the rule of corresponding states for calculation of heat transfer and critical heat flux. *Teploenergetika — Thermal Engineering*, 1963, vol. 4, no. 4, pp. 66–71.
- [15] Cooper M.G. Saturation nucleate pool boiling – a simple correlation. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, 1984, vol. 86, no. 2, pp. 785–793.
- [16] Gogonin I.I. The dependence of boiling heat transfer on the properties and geometric parameters of heat-transfer wall. *High Temperature*, 2006, vol. 44, no. 6, pp. 913–921.
- [17] Pioro I.L. Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42, no. 11, pp. 2003–2013.
- [18] Yagov V.V. Teploobmen pri razvitom puzyrkovom kipenii zhidkostey [Heat transfer in developed nucleate boiling of liquids]. *Teploenergetika — Thermal Engineering*, 1988, no. 2, pp. 4–9.
- [19] Kruzhilin G.N. Free-convection transfer of heat from a horizontal plate and boiling liquid. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1947, vol. 58, no. 8, pp. 1657–1660.
- [20] McNelly M.J. A correlation of rates of heat transfer to nucleate boiling of liquids. *Journal of the Imperial College Chemical Engineering Society*, 1953, vol. 7, pp. 18–34.
- [21] Gorenflo D. Pool Boiling. VDI-Heat Atlas. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993, Sect. Ha.
- [22] Touhami B., Abdelkader A., Mohamed T. Proposal for a correlation raising the impact of the external diameter of a horizontal tube during pool boiling. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, vol. 84, pp. 293–299.
- [23] Cornwell K., Houston S.D. Nucleate pool boiling on horizontal tubes: a convection-based correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, vol. 37, suppl. 1, pp. 303–309.
- [24] Molchanov T.I., Kukshinov N.V. Issledovanie vyazkosti i sostava gidroftorefira razlichnoy stepeni zagryazneniya [Investigation of viscosity and composition of hydrofluoroether with various degrees of contamination]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika — Russian Physics Journal*, 2026, vol. 69, no. 1, pp. 37–43.
- [25] Pranoto I., Rahman M.A., Waluyo J. The Role of pin fin array configurations and bubble characteristics on the pool boiling heat transfer enhancement. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 7, art. no. 232.

Kukshinov N.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kukshinov@bmstu.ru

Evstigneeva V.E., assistant, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: yevstigneeva@bmstu.ru

Molchanov T.I., Senior Lecturer, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: molchanovti@bmstu.ru