

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА КИПЕНИЕ В КАПИЛЛЯРНЫХ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

Е.А. Чугаев

С.Д. Корнеев

Л.А. Марюшин

Е.В. Афанасьева

kafedrapte@gmail.com

sdkorneev.sv@mail.ru

katzbalger@yandex.ru

eva71@bk.ru

Московский Политех, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований кипения воды в капиллярных щелевых каналах тупикового типа. Основное внимание уделено анализу влияния ключевых факторов: геометрии теплопередающей поверхности и наличию остаточных концентраций поверхностно-активных веществ. Разработана экспериментальная установка, позволяющая исследовать процессы теплообмена на поверхностях сложной геометрии в широком диапазоне значений тепловых нагрузок. Рассмотрены ячейки с различным межреберным зазором (1,5 и 1,0 мм), изготовленные из алюминия и стали. Установлено, что уменьшение межреберного зазора и использование материала с высоким коэффициентом теплоотдачи позволяет получить наиболее эффективный результат, выражающийся в увеличении коэффициента теплоотдачи. Для промышленного применения рекомендовано использовать устойчивые к агрессивным средам материалы (например, сталь Ст45ХН) вследствие большей химической стойкости и меньшей склонности к быстрому кризису кипения. Показано, что наличие остаточных поверхностно-активных веществ и загрязнений существенно снижает коэффициент теплоотдачи. Для количественной оценки их влияния использован косвенный метод, основанный на измерении краевого угла смачивания, установлена зависимость этого угла от остаточной концентрации поверхностно-активного вещества на поверхности. Полученные данные позволяют количественно прогнозировать снижение коэффициента теплоотдачи при увеличении краевого угла.

Ключевые слова

Кипение, теплообмен, капиллярный канал, поверхностно-активное вещество, коэффициент теплоотдачи

Результаты исследования демонстрируют влияние остаточной концентрации поверхностно-активного вещества на теплообмен при кипении. Установленная зависимость краевого угла смачивания от концентрации поверхностно-активного вещества позволяет диагностировать состояние поверхности. Для сохранения высокой эффективности теплообменных аппаратов необходимо учитывать этот фактор при проектировании оборудования, в том числе поверхностей нагрева

Поступила 09.12.2025

Принята 29.05.2026

© Автор(ы), 2026

Введение. Процесс кипения в ограниченном пространстве, таком как капиллярные щелевые каналы [1], является эффективным способом интенсификации теплообмена и находит применение в рекуперативных теплообменных установках [2–6]. Однако наличие на теплопередающей поверхности [7–9] остаточных количеств поверхностно-активных веществ (ПАВ) [9, 10], которые могут присутствовать после промывки или в виде примесей [11–13], способно существенно изменить гидродинамику и тепломассообмен в зоне кипения [14–16]. Ключевой параметр, определяющий эффективность процесса, — коэффициент теплоотдачи, который напрямую зависит от смачиваемости поверхности и ее чистоты. В настоящее время экспериментальные данные для условий с остаточными концентрациями ПАВ остаются ограниченными.

Большинство исследований [11–17] посвящено влиянию объемной концентрации ПАВ в жидкости, тогда как вопрос изучения остаточной концентрации ПАВ на теплопередающей поверхности и ее воздействия на краевой угол смачивания [17, 18] и, как следствие, на коэффициент теплоотдачи не изучен.

Цель работы — представить результаты экспериментального изучения закономерностей теплообмена при кипении воды в капиллярных тупиковых щелевых каналах в присутствии остаточной концентрации ПАВ и оценки изменения коэффициента теплоотдачи, а также методику для практического применения.

Задачи работы: реализация комплексного подхода к исследованию кипения теплоносителя в «большом объеме» и щелевых каналах на чистых поверхностях теплообмена; изучение влияния остаточной концентрации ПАВ на интенсивность кипения и коэффициент теплоотдачи; проведение сравнительного анализа полученных данных с последующим обобщением результата.

Материалы и методы. *Экспериментальная установка.* Для проведения исследований разработана экспериментальная установка (рис. 1),

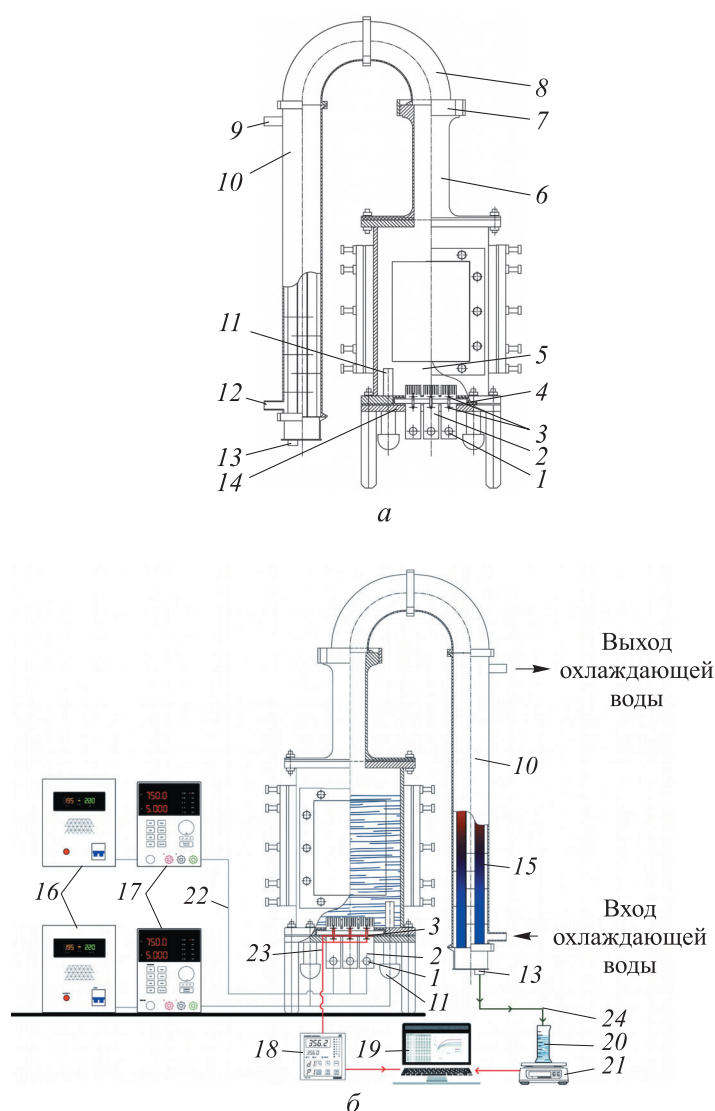


Рис. 1. Схемы рабочего участка экспериментальной установки (а) и экспериментальной установки (б):

1 — цилиндрический тэн; 2 — экспериментальная ячейка (из стали и алюминия); 3 — отверстия для термопар марки ТХК; 4 — прокладка резиновая; 5 — корпус рабочего сосуда; 6 — канал для отвода пара; 7 — кламп из коррозионно-стойкой стали; 8 — отвод пара под 90°; 9 — штуцер-вывод охлаждающей воды; 10 — кожухотрубный конденсатор; 11 — охранные тэны; 12 — штуцер-вход охлаждающей воды; 13 — узел отбора; 14 — нижняя прижимная плита с прижимными опорами; 15 — теплообменник (семь трубок с перегородками); 16 — стабилизатор напряжения; 17 — лабораторный автотрансформатор с регулировкой напряжения; 18 — ОВЕН ТРМ-138; 19 — персональный компьютер; 20 — мерная колба; 21 — лабораторные весы; 22 — электрический кабель-канал; 23 — термопары ТХК; 24 — полимерная трубка отбора конденсата

позволяющая изучать процесс кипения на теплопередающих поверхностях сложной геометрии. Конструкция установки обеспечивает возможность контроля ключевых параметров теплообмена в широком диапазоне значений тепловых нагрузок. Установка состоит из системы подачи и регулирования мощности на электронагреватели, конденсатора для отвода пара, системы подачи охлаждающей воды и аппаратуры для измерения и регистрации данных (термопары, стабилизаторы напряжения, автотрансформаторы, компьютер).

Рабочий сосуд представляет собой сварную герметичную камеру из коррозионно-стойкой стали, в которой происходит кипение. Особое внимание уделено системе герметизации: использованы специальные резиновые прокладки и кламповые соединения, обеспечивающие надежное уплотнение при циклических тепловых нагрузках.

Теплопередающие рабочие ячейки (рис. 2) выполнены в виде съемного модуля с системой поперечных ребер, образующих капиллярные каналы тупикового типа. Конструкция ячеек предусматривает возможность их быстрой замены. Размеры ячеек приведены в таблице.

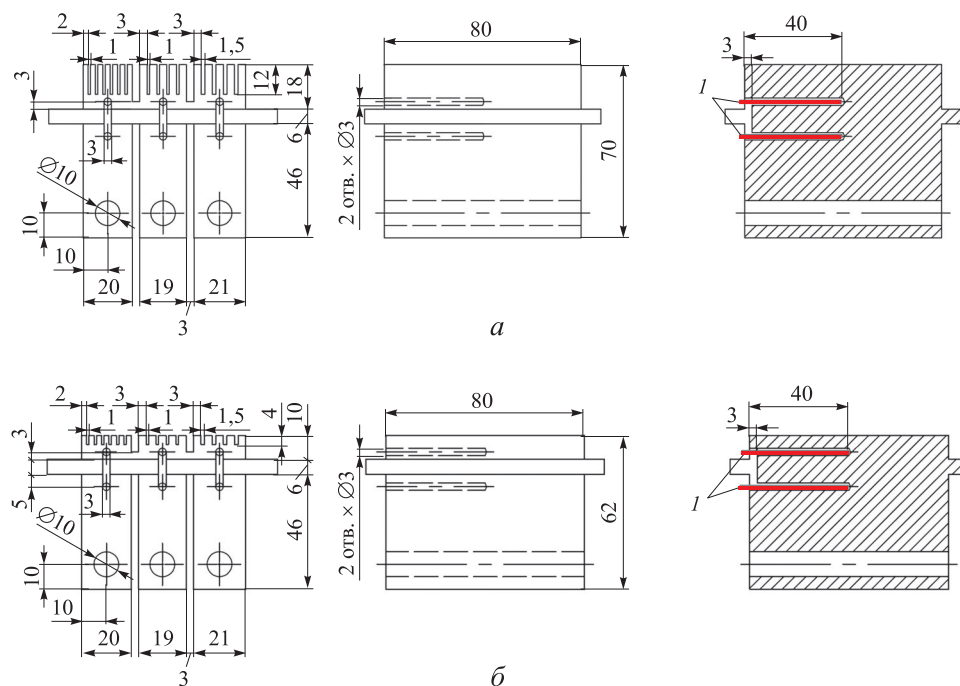


Рис. 2. Геометрические параметры алюминиевой А85 (а) и стальной Ст45ХН (б) ячеек (1 — термопары ТХК)

Геометрические параметры оребрения (длина ребра $l = 0,08$ м)

Параметр	Алюминий А85			Сталь Ст45ХН		
	1	2	3	1	2	3
Секции ячейки						
Высота ребра H , м	0,012	0,012	0,012	0,004	0,004	0,004
Ширина, м:						
ребра δ	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003
межреберного зазора b	0,001	0,001	0,0015	0,001	0,001	0,0015

Система нагрева состоит из двух контуров, основных тэнов, встроенных в теплопередающую ячейку, и охранных тэнов, обеспечивающих компенсацию тепловых потерь. Мощность каждого нагревателя регулируется независимо с использованием лабораторных автотрансформаторов со встроенными ваттметрами.

Система охлаждения включает в себя кожухотрубный холодильник с теплообменными трубками и систему подачи охлаждающей воды для конденсации пара при кипении в рабочем сосуда. Конденсированный пар собирается в мерную колбу с последующим определением массового расхода.

Особенность конструкции — модульный принцип построения, позволяющий оперативно заменять теплопередающие ячейки, модифицировать систему измерений и варьировать условия проведения опытов. Все соединения выполнены с учетом требований тепловой стабильности и минимальных потерь теплоты в окружающую среду.

Тарировка осуществляется следующим образом. На охранный тэн рабочего участка по кабель-каналу от стабилизатора подается мощность, необходимая для обеспечения устойчивого кипения жидкости, заполняющей рабочий участок.

Регулирование режима кипения обеспечивается автотрансформатором. С использованием ваттметров, установленных на автотрансформаторах, фиксируется выделяющаяся на тэне мощность. При достижении устойчивого режима кипения жидкости в полости рабочего участка электрический ток по кабель-каналу подается от стабилизатора на систему нагревателей теплопередающей экспериментальной ячейки.

Регулирование мощности проводится автотрансформатором со встроенными ваттметрами. При достижении установившегося режима кипения к теплопередающей оребренной поверхности ячейки плотно прижимается пароотборник. По трубке пар, образующийся на участке теплопередающей оребренной поверхности ячейки, поступает в измерительную емкость. Пар в трубке конденсируется в объем жидкости, заполняющей измерительную емкость.

В полости рабочего сосуда жидкость при кипении имеет температуру, близкую к температуре насыщения. Исходя из этого принято, что теплота, передаваемая через рабочую поверхность теплопередающей экспериментальной ячейки (см. рис. 2), расходуется на парообразование.

При последовательном перемещении пароотборника по поверхности теплопередающей оребренной поверхности ячейки определим плотность теплового потока q на ее различных участках. Эксперимент проведен при различных значениях электрической мощности, подаваемой на цилиндрический тэн теплопередающей экспериментальной ячейки. Для того чтобы минимизировать погрешность измерений, связанную с уносом капель кипящей жидкости, выполнено измерение энтальпии пара, поступающего в измерительную емкость. Путем соответствующих регулировок достигнуто постоянство плотности теплового потока, передаваемого через оребренную поверхность экспериментальной ячейки с погрешностью, не превышающей 8,2 % от средней плотности теплового потока по ее рабочей поверхности. На основе измеренной плотности теплового потока и разности температуры стенки и насыщенной жидкости рассчитан коэффициент теплоотдачи, достоверность которого подтверждается указанной погрешностью измерений.

При подготовке эксперимента все детали установки тщательно промыли и обезжирили. После сушки выполнена сборка рабочего участка. Первая серия эксперимента посвящена исследованию кипения воды в тупиковых капиллярных щелевых каналах при использовании оребренной поверхности. Вторая серия экспериментов представляет собой исследование кипения воды при использовании загрязненной оребренной поверхности. Затем рабочий участок заполняли рабочей жидкостью, для чистоты экспериментов использована дистиллированная вода. Для обеспечения кипения жидкости в рабочем участке на охранный тэн корпуса рабочего участка подавали мощность, необходимую для обеспечения кипения в нем жидкости на всех режимах. В результате температура жидкости, находящейся в корпусе рабочего участка, поддерживалась близкой к температуре насыщения. Контрольные измерения показали, что отклонение температуры кипящей жидкости от температуры насыщения не превышало 0,1 °С.

Для обеспечения тепловой нагрузки на греющей стенке оребрения на тэны подавалась соответствующая мощность.

Результаты. Результаты сопоставления экспериментальных данных, полученных в процессе отладочных экспериментов, с данными из [1, 2, 8, 19–21] по исследованию кипения в «большом объеме» приведены на рис. 3.

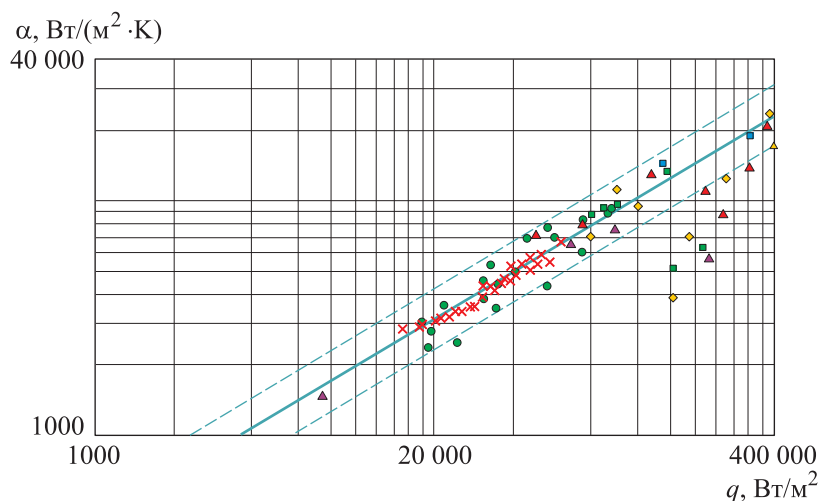


Рис. 3. Сопоставление результатов исследований с данными из [1, 2] (•, ♦), моделями, предложенными Ф.П. Минченко (▲), У.Г. Мак-Адамсом (W.H. McAdams) (■), М.Т. Чичелли, К.Ф. Бонилья (M.T. Cichelli, C.F. Bonilla) (▣), Ш. Нукиямой (Sh. Nukiyama) (▲), с данными верификационных экспериментов (×) и расчетной зависимостью, полученной по формуле Лабунцова (—) по исследованию кипения в «большом объеме»

Они удовлетворительно согласуются. Результаты анализа позволяют судить о надежности полученных в дальнейшем экспериментальных данных.

Для обеспечения требуемой тепловой нагрузки на греющей стенке на электрические тэны подавали мощность в диапазоне значений 100...1000 Вт. Для оценки теплового потока в условиях эксперимента использована методика, описанная в [2, 4, 6]. В целях верификации полученных данных выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных значений. Результаты сравнения приведены на рис. 4.

Экспериментальные данные по кипению воды в тупиковых капиллярных щелевых каналах при использовании оребренной поверхности теплообмена удовлетворительно согласуются с расчетными.

Следующая серия экспериментов по исследованию кипения выполнена с ячейками сложной геометрической формы. Ячейка имеет оребрение с межреберным зазором 1,5 и 1,0 мм. Порядок проведения эксперимента аналогичен. Дальнейшие исследования проведены с использованием загрязненных ячеек и кипения с варьированием уровня остаточных концентраций ПАВ. Для более быстрого появления отложений загрязнение ячеек осуществлено с помощью теплоносителя с повышенным содержанием сульфатов.

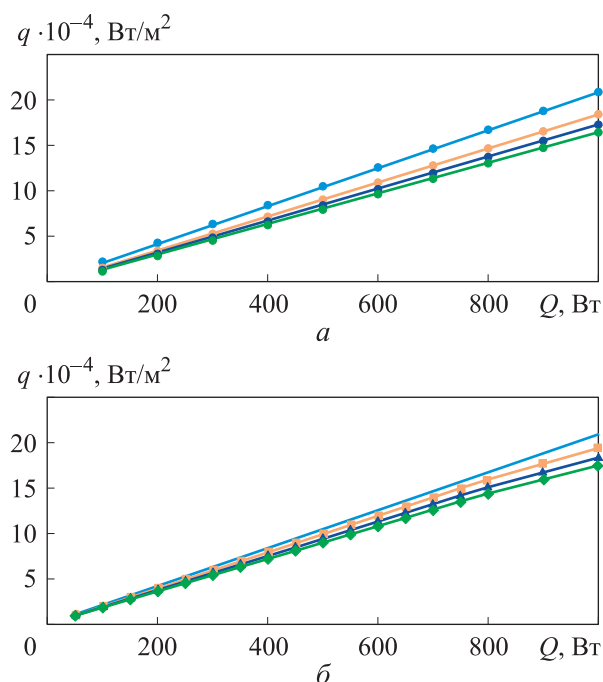


Рис. 4. Сопоставление расчетных (•, —) и экспериментальных значений плотности теплового потока для каждой рабочей ячейки из А85 (а) и Ст45ХН (б) при $\delta = 0,002$, $b = 0,001$ (•, ▲), $\delta = 0,003$, $b = 0,001$ (◐, ◑), $\delta = 0,003$, $b = 0,0015$ (◒, ◔)

Остаточная концентрация ПАВ определена косвенным эмпирическим методом через измерение краевого угла смачивания поверхности. После каждого эксперимента проведена фотофиксация краевого угла смачивания на поверхности ребра экспериментальной ячейки по методике, которая использована в [17, 18]: с использованием лабораторного шприца на поверхность аккуратно наносили каплю объемом 2...5 мкл, избегая разбрызгивания, после чего в течение 1...2 мин происходила стабилизация формы капли и выполнялась фотофиксация для определения угла.

Для оценки остаточной концентрации на поверхности ячейки измерен краевого угол смачивания в зависимости от концентрации ПАВ [17, 18]. Взято несколько образцов (пластинки из Ст45ХН), каждая пластинка помещена в различные концентрации ПАВ на равные промежутки времени (1 ч) при контролируемой температуре для ПАВ. Таким образом, на каждом образце находится известное количество ПАВ. Концентрация на поверхности ($c_{\text{ПАВ}}$, мг/м²) будет прямо пропорциональна концентрации ПАВ в растворе, из которого проводилась адсорбция. Далее осуществлена фотофиксация для определения статического краевого угла смачивания θ

на каждом эталонном образце. Зависимость краевого угла смачивания от остаточной концентрации на поверхности теплообмена на основе экспериментальных данных приведена на рис. 5.

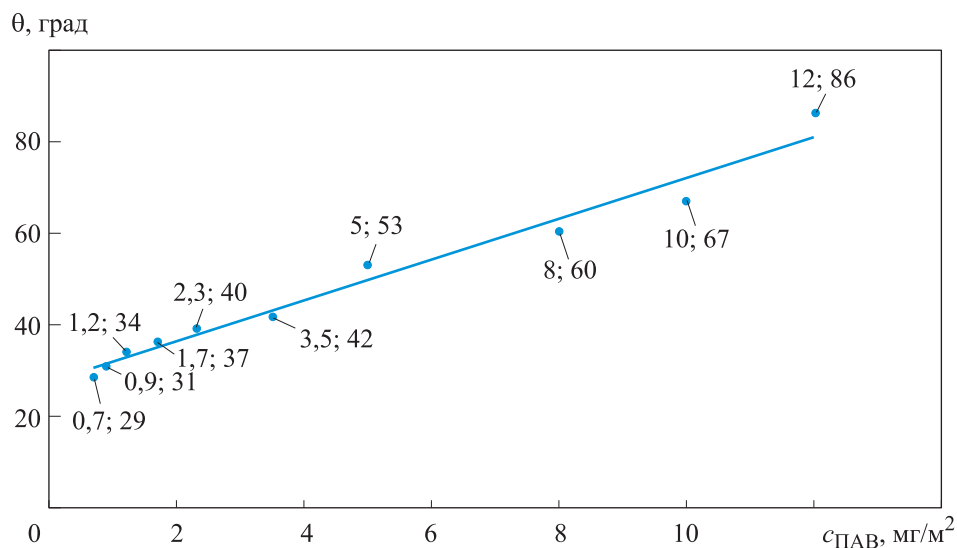


Рис. 5. Зависимость краевого угла смачивания от остаточной концентрации на поверхности теплообмена на основе экспериментальных данных

Экспериментально подтверждено, что уменьшение межреберного зазора (до 1 мм) в сочетании с использованием материалов высокой теплопроводности (А85) обеспечивает максимальный рост коэффициента теплоотдачи. Однако для промышленного внедрения обоснована целесообразность использования стали Ст45ХН: несмотря на меньшую теплопроводность, она имеет повышенную химическую стойкость к агрессивным средам и меньшую склонность к быстрому наступлению кризиса кипения.

Получены экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для ячеек с различным межреберным зазором (1,5 и 1,0 мм) и из разных материалов (А85, Ст45ХН). В диапазоне значений плотности теплового потока 20...250 кВт/м² коэффициент теплоотдачи для чистой поверхности составил 12 500...32 800 Вт/(м² · К). Установлено, что уменьшение межреберного зазора с 1,5 до 1,0 мм способствует интенсификации теплообмена: коэффициент теплоотдачи возрастает в среднем на 22...35 %. На практике для промышленного применения в агрессивных средах предпочтительнее использовать сталь Ст45ХН, так как она менее подвержена воздействию реагентов.

В процессе экспериментов получена зависимость угла смачивания от остаточной концентрации ПАВ на поверхности теплообмена. По сравнению с чистыми поверхностями наличие остаточных ПАВ приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на 50 % (при концентрации ПАВ на поверхности более 5 мг/м²).

Полученные данные позволяют количественно прогнозировать снижение эффективности теплообмена при увеличении краевого угла смачивания. Установленная зависимость (см. рис. 5) позволяет диагностировать состояние поверхности нагрева и своевременно принимать меры для сохранения высокой эффективности теплообменных аппаратов.

Обсуждение полученных результатов. Результаты экспериментов показали, что наличие остаточной концентрации ПАВ и загрязнений на поверхности нагрева существенно влияет на процесс кипения в капиллярных щелевых каналах. Установлено, что это приводит к изменению смачиваемости поверхности (увеличению краевого угла смачивания) и, следовательно, к ухудшению условий парообразования и снижению коэффициента теплоотдачи. Полученные количественные зависимости подтверждают необходимость учета загрязнения поверхности и количества остаточной концентрации ПАВ при проектировании и эксплуатации высокоэффективных теплообменных аппаратов, работающих в режиме кипения.

Заключение. На основании экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы и рекомендации.

Установлено, что уменьшение межреберного зазора с 1,5 до 1,0 мм обеспечивает существенную интенсификацию теплообмена. Несмотря на превосходство алюминия по теплопроводности, для промышленной эксплуатации в агрессивных средах рациональнее применять сталь, обладающую повышенной химической стойкостью и отодвигающую наступление кризиса кипения.

Подтверждено, что остаточные концентрации ПАВ в большом объеме (> 2 мг/м²) и загрязнения поверхности ведут к значительному уменьшению коэффициента теплоотдачи. В исследовании получена корреляция (см. рис. 5) между краевым углом смачивания и концентрацией ПАВ, что открывает возможности для неразрушающего диагностирования состояния теплопередающих поверхностей.

В качестве практической рекомендации предлагается предусматривать системы глубокой очистки теплоносителя для минимизации остаточных концентраций ПАВ. При разработке новых конструкций теплообменников

сложной геометрии необходимо закладывать поправочные коэффициенты, учитывающие деградацию характеристик поверхности в реальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М., Атомиздат, 1979.
- [2] Савельев И.Л., Марюшин Л.А., Чугаев Е.А. и др. Экспериментальное исследование кипения жидкости на ионно-модифицированной поверхности теплообмена. *Промышленная энергетика*, 2025, № 3, с. 25–29.
DOI: <https://doi.org/10.71759/y0w5-f995>
- [3] Усанова О.Ю., Рязанцева А.В., Сенникова О.Б. и др. Влияние ионной имплантации на свойства чугуна, используемого в конструкциях горнодобывающих машин. *Устойчивое развитие горных территорий*, 2023, т. 15, № 4, с. 912–920.
DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-912-920>
- [4] Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях. *ТВТ*, 2021, № 2, т. 59, с. 280–312. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364421020149>
- [5] Kaskov S.I. Calculation and experimental study of heat exchange in a system of plane-parallel channels with surface intensifiers. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 211–220. DOI: <https://doi.org/10.20537/nd210206>
- [6] Тупотилова А.В., Гареев Э.И., Беляев А.В. и др. Повышение эффективности теплообменных устройств при фазовых переходах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 4 (115), с. 63–76. EDN: WYSOWH
- [7] Афанасьева Е.В. Исследование коэффициента теплоотдачи в теплообменных аппаратах. *Наука, техника, педагогика в высшей школе. Матер. Всерос. науч.-практ. конф.* М., Московский Политех, 2023, с. 151–155. EDN: ZHSQHN
- [8] Гортышов Ю.Ф., ред. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Казань, КГТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2009.
- [9] Марюшин Л.А., Савельев И.Л., Чугаев Е.А. и др. Исследование кипения жидкости на ионно-модифицированной поверхности теплообмена. *Энергосбережение и водоподготовка*, 2024, № 2, с. 17–21. EDN: RUTCVT
- [10] Mata M., Ortiz B., Luhar D., et al. How dynamic adsorption controls surfactant-enhanced boiling. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, art. 18170.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21313-1>
- [11] Wu J., Li J., Hao D. Research progress on hybrid nanofluids for heat transfer process intensification. *Chin. J. Eng.*, 2024, vol. 46, no. 5, pp. 937–948.
DOI: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.08.31.001>

- [12] Wen T., Luo J., Jiao K., et al. Comparison of pool boiling heat transfer performance between aqueous cationic and anionic surfactant solutions with similar ionic group. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 216, art. 119136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119136>
- [13] Kini G., Chandrasekaran S., Hughes M., et al. Experimental investigation of surfactant-enhanced ammonia-water absorption in a shell-and-tube absorber. *Int. J. Refrig.*, 2021, vol. 129, pp. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.04.034>
- [14] Oflaz F. Evaluation of the thermo-hydraulic behavior of water-based graphene and Al_2O_3 hybrid nanofluids in a circular tube through CFD simulations. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2025, vol. 150, no. 8, pp. 3789–3804. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-025-13993-4>
- [15] Zhu C., Sun L., Feng Y., et al. A numerical study of prediction method for terminal velocity of rising microbubbles in quiescent liquid by simplified rear stagnant cap model. *Can. J. Chem. Eng.*, 2025, vol. 104, no. 1, pp. 477–489. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.25775>
- [16] Han H., Yin W., Yang B., et al. Adsorption behavior of sodium oleate on iron minerals and its effect on flotation kinetics. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 2022, vol. 647, art. 129108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129108>
- [17] Кархов А.О., Гореликова А.Е., Воробьев М.А. Влияние поверхностно-активных веществ в малых концентрациях на размеры газовых пузырей в наклонном канале. *Теплофизика и аэромеханика*, 2025, т. 32, № 1, с. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.63430/TIA202501017>
- [18] Рехвиашвили С.Ш., Сокуров А.А. Моделирование свойств малой капли на частично смачиваемой поверхности твердого тела. *ЖТФ*, 2024, т. 94, № 4, с. 554–560. EDN: XEOKAF
- [19] Pulagam M., Rout S., Muduli K., et al. Internal finned heat exchangers: thermal and hydraulic performance review. *Int. J. Heat Technol.*, 2024, vol. 42, pp. 583–592. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420225>
- [20] Nushtaeva A.V., Vilkova N.G. Hydrophobization of silica particles with various cationic surfactants. *ChemChemTech*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 41–45. DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6321>
- [21] Ni S., Cheng C.K., Li X., et al. The hydrodynamic aspect mechanism of the effect of surfactant on boiling heat transfer. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2024, vol. 156, art. 107694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107694>

Чугаев Евгений Анатольевич — старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Московского Политеха (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38).

Корнеев Сергей Дмитриевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Московского Политеха (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38).

Марюшин Леонид Александрович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» Московского Политеха (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38).

Афанасьева Елена Викторовна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Московского Политеха (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чугаев Е.А., Корнеев С.Д., Марюшин Л.А. и др. Влияние остаточной концентрации поверхностно-активных веществ на кипение в капиллярных щелевых каналах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 4 (127), с. 21–36. EDN: PKDRTR

**IMPACT OF RESIDUAL SURFACTANT CONCENTRATION
ON BOILING IN CAPILLARY SLIT CHANNELS**

E.A. Chugaev

kafedrapte@gmail.com

S.D. Korneev

sdkorneev.sv@mail.ru

L.A. Maryushin

katzbalger@yandex.ru

E.V. Afanaseva

eva71@bk.ru

Moscow Polytech, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of experimental studies of water boiling in dead-end capillary slit channels. The main focus is on analyzing the influence of two key factors: the geometry of the heat transfer surface and the presence of residual concentrations of surfactants. An experimental setup was developed to investigate heat transfer processes on complex-geometry surfaces over a wide range of thermal loads. Cells with different fin spacing (1.5, and 1 mm), made of aluminum and steel, were examined. It was found that reducing the interfin gap and using a material with a high heat transfer coefficient yields the most effective results. For industrial applications, the use of materials resistant to aggressive environments (such as St45KHN steel, due to its greater chemical resistance and lower susceptibility to rapid boiling crisis) is recommended. It was shown that the

Keywords

Boiling, heat transfer, capillary channel, surface active agent, heat transfer coefficient

presence of residual surfactants and contaminants significantly reduces the heat transfer coefficient. An indirect method based on measuring the contact angle was used to quantitatively assess their influence, and a relationship between the contact angle and the residual surfactant concentration on the surface was established. The research results demonstrate the effect of residual surfactant concentration on boiling heat transfer. The established relationship between the contact angle and surfactant concentration enables diagnostics of the surface condition. To maintain high efficiency of heat exchange equipment, this factor must be taken into account during equipment design, including the design of heating surfaces

Received 09.12.2025

Accepted 29.05.2026

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979.
- [2] Savelyev I.L., Maryushin L.A., Chugaev E.A., et al. Experimental investigation of liquid boiling on an ion-modified heat transfer surface. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2025, no. 3, pp. 25–29 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.71759/y0w5-f995>
- [3] Usanova O.Yu., Ryazantseva A.V., Sennikova O.B., et al. Ionic implantation influence on the properties of cast iron used in the structures of mining machines and devices. *Ustoychivoe razvitie gornyykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], 2023, vol. 15, no. 4, pp. 912–920 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-912-920>
- [4] Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N. Heat transfer enhancement at boiling and evaporation of liquids on modified surfaces — a review. *High Temp.*, 2021, vol. 59, no. 2, pp. 405–432. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X21020140>
- [5] Kaskov S.I. Calculation and experimental study of heat exchange in a system of plane-parallel channels with surface intensifiers. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 211–220. DOI: <https://doi.org/10.20537/nd210206>
- [6] Tupotilova A.V., Gareev E.I., Belyaev A.V., et al. Improving the heat exchanger efficiency at the phase transitions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 4 (115), pp. 63–76 (in Russ.). EDN: WYSOWH
- [7] Afanasyeva E.V. [Investigation of the heat transfer coefficient in heat exchangers]. *Nauka, tekhnika, pedagogika v vysshey shkole. Mater. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Science, Engineering, Pedagogy in Higher School. Proc. Russ. Sc.-Pract. Conf.], Moscow, Moscow Polytech, 2023, pp. 151–155 (in Russ.). EDN: ZHSQHN

- [8] Gortyshov Yu.F., ed. Teplogidravlicheskaya effektivnost perspektivnykh sposobov intensivifikatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya [Thermal-hydraulic efficiency of advanced methods for heat transfer enhancement in channels of heat exchange equipment]. Kazan, KNRTU–KAI Publ., 2009.
- [9] Maryushin L.A., Savelyev I.L., Chugaev E.A., et al. Investigation of liquid boiling on an ion-modified heat transfer surface. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], 2024, no. 2, pp. 17–21 (in Russ.). EDN: RUTCVT
- [10] Mata M., Ortiz B., Luhar D., et al. How dynamic adsorption controls surfactant-enhanced boiling. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, art. 18170.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21313-1>
- [11] Wu J., Li J., Hao D. Research progress on hybrid nanofluids for heat transfer process intensification. *Chin. J. Eng.*, 2024, vol. 46, no. 5, pp. 937–948.
DOI: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.08.31.001>
- [12] Wen T., Luo J., Jiao K., et al. Comparison of pool boiling heat transfer performance between aqueous cationic and anionic surfactant solutions with similar ionic group. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 216, art. 119136.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119136>
- [13] Kini G., Chandrasekaran S., Hughes M., et al. Experimental investigation of surfactant-enhanced ammonia-water absorption in a shell-and-tube absorber. *Int. J. Refrig.*, 2021, vol. 129, pp. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.04.034>
- [14] Oflaz F. Evaluation of the thermo-hydraulic behavior of water-based graphene and Al_2O_3 hybrid nanofluids in a circular tube through CFD simulations. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2025, vol. 150, no. 8, pp. 3789–3804.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-025-13993-4>
- [15] Zhu C., Sun L., Feng Y., et al. A numerical study of prediction method for terminal velocity of rising microbubbles in quiescent liquid by simplified rear stagnant cap model. *Can. J. Chem. Eng.*, 2025, vol. 104, no. 1, pp. 477–489.
DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.25775>
- [16] Han H., Yin W., Yang B., et al. Adsorption behavior of sodium oleate on iron minerals and its effect on flotation kinetics. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.*, 2022, vol. 647, art. 129108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129108>
- [17] Karkhov A.O., Gorelikova A.E., Vorobyev M.A. Effect of a small concentration of surfactant on gas bubble sizes for a flow in an inclined channel. *Thermophys. Aeromech.*, 2025, vol. 32, no. 1, pp. 161–169. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864325010172>
- [18] Rekhviashvili S.Sh., Sokurov A.A. Modeling of properties of a droplet on a partially wetted solid surface. *ZhTF*, 2024, vol. 94, no. 4, pp. 554–560 (in Russ.). EDN: XEOKAF
- [19] Pulagam M., Rout S., Muduli K., et al. Internal finned heat exchangers: thermal and hydraulic performance review. *Int. J. Heat Technol.*, 2024, vol. 42, pp. 583–592.
DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420225>

[20] Nushtaeva A.V., Vilkova N.G. Hydrophobization of silica particles with various cationic surfactants. *ChemChemTech*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 41–45.

DOI: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6321>

[21] Ni S., Cheng C.K., Li X., et al. The hydrodynamic aspect mechanism of the effect of surfactant on boiling heat transfer. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2024, vol. 156, art. 107694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107694>

Chugaev E.A. — Senior Lecturer, Department of Industrial Heat Power Engineering, Moscow Polytech (Bolshaya Semyonovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation).

Korneev S.D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Industrial Heat Power Engineering, Moscow Polytech (Bolshaya Semyonovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation).

Maryushin L.A. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Moscow Polytech (Bolshaya Semyonovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation).

Afanaseva E.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Heat Power Engineering, Moscow Polytech (Bolshaya Semyonovskaya ul. 38, Moscow, 107023 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Chugaev E.A., Korneev S.D., Maryushin L.A., et al. Impact of residual surfactant concentration on boiling in capillary slit channels. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 4 (127), pp. 21–36 (in Russ.). EDN: PKDRTR