

УДК 536.423

О МЕХАНИЗМЕ КИПЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ “МАСЛО В ВОДЕ”

© 2022 г. Б. М. Гасанов*

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**E-mail: gbm@itp.uran.ru*

Поступила в редакцию 16.10.2020 г.

После доработки 19.02.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении в условиях естественной конвекции эмульсии “масло в воде” на поверхности проволочного нагревателя диаметром 0.10 мм. Исследования проведены с эмульсией кремний-органической жидкости (силиконовое масло) ПЭС-5—вода при концентрации масла от 0.5 до 5.0 об. %. С применением скоростной видеосъемки визуализирован процесс пузырькового кипения воды и эмульсии “масло ПЭС-5—вода”. В эмульсии в зародышеобразовании участвует вода, а капельки масла взаимодействуют как с поверхностью нагрева, так и с пузырьками пара. Капельки масла из-за хорошего смачивания поверхности нагрева подавляют потенциальные центры кипения для воды, что приводит к увеличению температуры начала кипения эмульсии. Смачиваемость и низкая теплопроводность масла также приводят к ухудшению локальных характеристик теплообмена при пузырьковом кипении эмульсии.

DOI: 10.31857/S004036442201015X

ВВЕДЕНИЕ

Эмульсии представляют собой смесь из двух взаимно нерастворимых жидкостей, в которых капельки дисперсной фазы распределены в непрерывной дисперсионной среде. Эмульсии имеют широкое применение в химической, пищевой, косметологической, фармацевтической и в других видах промышленности. В качестве смазочно-охлаждающих жидкостей эмульсии “масло в воде” используются при металлообработке и в процессах трибологии.

Масло и вода могут образовывать два типа эмульсий. Один тип представляет собой эмульсию “вода в масле”, в которой небольшие капельки воды диспергированы в масле. В этом случае масло представляет собой непрерывную дисперсионную среду. Если капли масла диспергированы в воде, то такие эмульсии называют “масло в воде”. Температура кипения масла, как правило, выше температуры кипения воды. При нагреве эмульсии “вода в масле” в кипении будут участвовать только капельки воды, так как температура кипения дисперсной фазы ниже температуры кипения дисперсионной среды. Особенности кипения эмульсий, у которых дисперсная фаза низкокипящая, и возможные области их практического использования в качестве эффективных теплоносителей представлены в обзорной статье [1].

Впервые теплообмен в эмульсиях “масло в воде” при кипении в большом объеме был исследован в 1978 г. [2]. Авторы измеряли плотность теплового потока от никелевой проволоки диаметром 0.20 мм и длиной 70 мм при атмосферном давлении. Эксперименты проводились с четырь-

мя типами масел: *n*-додекан, *n*-ундекан, трансформаторные масла KF96 и KF54. Проведенные исследования показали, что в эмульсиях типа “масло в воде” кипение начинается при значительном превышении температуры кипения воды. Авторы полагали, что большие перегревы являются результатом смачивания поверхности нагрева капельками масла. Коэффициент теплоотдачи с увеличением концентрации масла в эмульсиях снижается. Использование поверхностно-активных веществ заметно влияло на коэффициент теплоотдачи, но свойства используемых масел оказывали незначительное влияние на коэффициент теплоотдачи.

В отличие от кипения чистых жидкостей и гомогенных растворов, в кипящей эмульсии “масло в воде” капельки дисперсной фазы взаимодействуют как с поверхностью нагрева, так и с пузырьками пара, тем самым оказывая влияние на характеристики теплообмена. В настоящей работе с использованием скоростной видеосъемки визуализирован процесс пузырькового кипения дистиллированной воды и эмульсии кремний-органической жидкости (силиконовое масло) ПЭС-5—вода на поверхности проволочного нагревателя.

ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментах измерялся коэффициент теплоотдачи от горизонтальной платиновой проволоки диаметром 0.10 мм и длиной 35 мм к исследуемым теплоносителям при атмосферном давлении. Использование платиновой проволоки в качестве нагревателя позволяло одновременно определять как мощность, выделяемую на ее поверхности, так

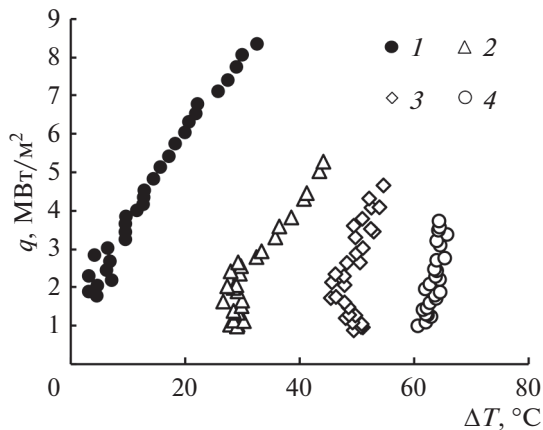


Рис. 1. Кривые кипения воды и эмульсии ПЭС-5-вода при $T_{\text{ж}} = 22.0^{\circ}\text{C}$: 1 – вода, 2 – эмульсия ПЭС-5-вода с концентрацией масла 0.5 об. %, 3 – 1.0, 4 – 5.0.

и ее температуру. Эксперименты начинались с температурной градуировки проволоки по образцовому платиновому термометру сопротивления. Градуировка проводилась в масле ПЭС-5 в интервале температур 20–280°C при пропускиании через проволоку “негреющего” электрического тока, примерно равного 1 МА. Определялась зависимость сопротивления проволоки от ее температуры. Основную погрешность в градуировочную зависимость вносила неточность термостатирования масла ПЭС-5. Максимальная погрешность градуировки составляла $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ на верхнем пределе исследуемого диапазона температур.

Сложности визуализации процесса кипения эмульсий связаны с их непрозрачностью. В настоящей работе визуализация процесса пузырькового кипения проводилась с эмульсией с концентрацией 0.5 об. % ПЭС-5 в воде. Эксперименты проводились при объемной температуре жидкостей $T_{\text{ж}} = 22^{\circ}\text{C}$. Проволочный нагреватель погружался в эмульсию и нагревался постоянным электрическим током. Температура в объеме жидкости измерялась с помощью термопары. Наблюдение за процессами, протекающими на поверхности нагрева при кипении воды и эмульсии, проводилось с применением скоростной видеокамеры (до 5000 кадр/с). Детальное описание экспериментальной установки приведено в работе [3].

Температура нормального кипения ПЭС-5 превышает 250°C. Плотность воды и ПЭС-5 при комнатной температуре имеют одинаковые значения (998 кг/м^3), что позволяет при получении эмульсии не использовать поверхностно-активные вещества для ее стабилизации. Жидкости, из которых состояла эмульсия, не подвергались деаэрации, поскольку при получении эмульсии они не изолировались от атмосферного воздуха. Эмульсии готовились путем интенсивного перемешивания в течение 15 мин исходных жидкостей пропеллерной мешалкой при 10000 об/мин. При перемешива-

нии получалась полидисперсная эмульсия с минимальным диаметром капелек 5–10 мкм и максимальным – 80–100 мкм. Основная доля капелек дисперсной фазы имела диаметр 40–60 мкм. Распределение капелек в дисперсионной среде определялось визуально с помощью оптического микроскопа. Полученная эмульсия оставалась стабильной в течение всего времени проведения экспериментов.

Кривые кипения для воды и эмульсии масло ПЭС-5-вода в зависимости плотности теплового потока q от температурного напора $\Delta T = T_w - T_{\text{кип}}$ (где T_w – температура нагревателя, $T_{\text{кип}}$ – температура нормального кипения воды) показаны на рис. 1. Эксперименты проводились с недогревом $\Delta T_{\text{н}} = T_{\text{кип}} - T_{\text{ж}}$, равным 78°C. Значение отводимых тепловых потоков эмульсией масло ПЭС-5-вода при конвективном теплообмене занимает промежуточное положение между данными, полученными для воды и масла ПЭС-5. Существенное снижение коэффициента теплоотдачи к эмульсии наблюдается при диспергировании в воде малого количества (0.5 об. %) масла. При дальнейшем увеличении концентрации масла снижение теплоотдачи происходит не столь значительно. Для инициирования зародышеобразования в эмульсии требуется некоторый перегрев поверхности нагрева выше температуры кипения воды, а ростом концентрации масла такой перегрев увеличивается.

В кипящей эмульсии масло ПЭС-5-вода в зародышеобразовании участвует только вода. На рис. 2 показаны кадры кипения переохлажденной дистиллированной воды при разных плотностях теплового потока. Съемка проводилась с частотой 350 кадр/с. При низких тепловых потоках (1.8 МВт/м^2) на поверхности нагрева совместно с крупными паровыми пузырями периодически возникают струи микропузырьков, направленные под разными углами в объем жидкости (рис. 2а, 2б). На поверхности проволоки образуется паровой пузырь диаметром около 50 мкм, который, схлопываясь, испускает струи микропузырьков. Образованные таким образом микропузырьки, не конденсируясь, медленно поднимаются к свободной поверхности воды. Испускание микропузырьков прекращается, когда маленький паровой пузырь перестает схлопываться и начинает расти в объеме.

При тепловых потоках от 1.8 до 6.8 МВт/м² на поверхности нагрева присутствуют крупные паровые пузыри, которые могут достигать в диаметре 800–1000 мкм. Механизм отвода тепла от нагреваемой поверхности крупными пузырьками пара следующий [4]: в основании парового пузыря происходит испарение жидкости, далее пар переносится к вершине пузырька и конденсируется на его относительно более холодной верхней части. Такое испарение и конденсация может происходить достаточно продолжительное время. Вода не подвергалась де-

аэрации, поэтому есть вероятность того, что крупные пузыри, “сидящие” на поверхности нагрева при малых тепловых потоках, образованы из неконденсирующегося газа, растворенного в воде. При кипении недеаэрированной воды на поверхности капилляра диаметром 1 мм и длиной 24 мм авторы [5]

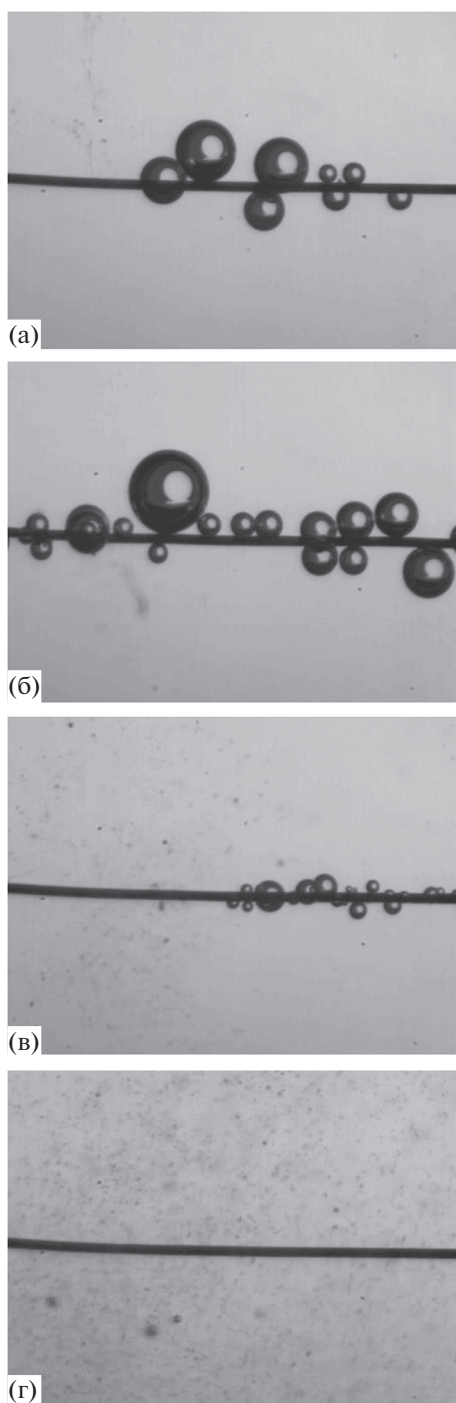


Рис. 2. Кадры кипения недогретой воды при разных плотностях теплового потока: (а) — $q = 1.8 \text{ МВт/м}^2$, (б) — 3.7, (в) — 6.8, (г) — 7.8.

определяли газовые пузыри на поверхности нагрева следующим образом: при снятии тепловой нагрузки пузыри газа оставались в течение долгого времени (вплоть до суток) прикрепленными к поверхности капилляра. Обратного растворения газа из выделенных пузырьков в воду не происходило. Авторы [5] полагают, что при малых тепловых потоках функции крупных паровых пузырей, в которых происходит испарение и конденсация, могут брать на себя длительно пребывающие на поверхности нагрева газовые пузыри.

В данных экспериментах при тепловых потоках выше 6.8 МВт/м^2 имеет место явление микропузырькового кипения (рис. 2в, 2г), которое продолжается до образования кризиса пузырькового кипения при $q_{кр} = 8.3 \text{ МВт/м}^2$. Микропузырьковое кипение возникает вблизи критического теплового потока при определенном переохлаждении жидкости. При схлопывании (конденсации) парового пузырька в объеме жидкости выделяются мелкие пузырьки неконденсирующегося газа. На рис. 2г показано мелкодисперсное облако вокруг нагреваемой проволоки, образованное при схлопывании парового пузыря. На поверхности проволоки паровые пузыри не видны, так как временное разрешение используемой в настоящей работе камеры не позволяет регистрировать период жизни парового пузыря в недогретой жидкости, который лежит в пределах 300–800 мкс [6].

На рис. 3 показан кадр при конвективном теплообмене с эмульсией ПЭС-5—вода, когда температура нагреваемой проволоки T_w превышает температуру кипения воды, $T_w = 125^\circ\text{C}$. Стрелками отмечены капельки масла, контактирующие с поверхностью нагрева. Краевой угол смачивания каплями масла меньше 90° , что свидетельствует о хорошей смачиваемости. Смачиваемость, высокая температура кипения и низкая теплопроводность масла ПЭС-5 при конвективном теплообмене являются основными факторами уменьшения отводимых тепловых потоков эмуль-

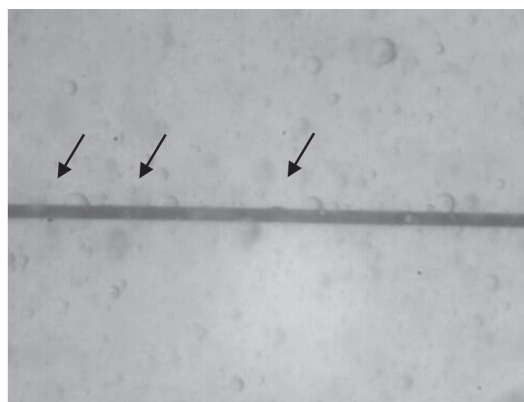


Рис. 3. Капельки масла ПЭС-5 на поверхности проволоки при $T_w = 125^\circ\text{C}$.

сией ПЭС-5—вода по сравнению с водой. Частичная смачиваемость маслом поверхности нагрева также способствует снижению плотности центров зародышеобразования, в результате чего кипение эмульсии начинается при более высоких температурах нагрева. С увеличением концентрации масла в эмульсии перегрев поверхности нагрева растет (см. рис. 1), так как увеличивается количество ка-

пелек, способных блокировать большее число центров кипения. Таким образом, зародышеобразование в дисперсионной среде эмульсии может происходить на участках поверхности, не занятых капельками масла.

При кипении эмульсии масло ПЭС-5—вода, как и при кипении воды с недогревом, в результате коалесценции мелких пузырьков, на поверхности нагрева образуются крупные паровые пузыри (рис. 4). Поверхность раздела паровой пузырь—эмульсия покрывается пленкой масла, которая образуется в результате взаимодействия на поверхности нагрева капелек масла с пузырьками пара в процессе их зарождения, роста и коалесценции.

Капельки масла, находящиеся на поверхности нагрева, оказывают влияние на локальный теплообмен при кипении эмульсии. На рис. 4а показан крупный паровой пузырь диаметром около 1500 мкм, который имеет линию прямого контакта с поверхностью нагрева, в основании пузыря — преимущественно с маслом и выше основания пузыря — с эмульсией. После достижения критического размера паровой пузырь теряет прямой контакт с поверхностью нагрева и начинает его покидать (рис. 4б). Пространство между поверхностью нагрева и паровым пузырем занимает слой масла (рис. 4б, 4в), который существенно снижает интенсивность теплоотдачи на локальном участке нагреваемой проволоки. Для полной эвакуации паровому пузырю необходимо некоторое время, чтобы преодолеть силу межфазного натяжения на границе раздела пузырь—масло (рис. 4в), после чего он покидает тепловой пограничный слой. При этом часть масла уносится в объем эмульсии, а часть остается на поверхности нагрева (рис. 4г), подавляя активный центр кипения.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ), вводимые в эмульсию, снижают поверхностное натяжение на межфазной границе капелька дисперсной фазы—дисперсионная среда и препятствуют процессам коалесценции, коагуляции и седиментации. При конвективном теплообмене изменения поверхностного натяжения на межфазной границе капелька дисперсной фазы—поверхность нагрева—эмульсия оказывают влияние на краевой угол смачивания капельки масла, что будет отражаться на площади ее контакта с поверхностью нагрева. Чем больше площадь контакта, тем больше заблокированных центров кипения и тем выше температура начала кипения эмульсии. При пузырьковом кипении ПАВ также изменяет межфазное натяжение на линии контакта трех фаз паровой пузырь—поверхность нагрева—эмульсия и межфазное натяжение на границе раздела паровой пузырь—масло при эвакуации парового пузыря с поверхности нагрева, как это показано на рис. 4. Этими соображениями можно объяснить тот факт, что на характеристики теплообмена при

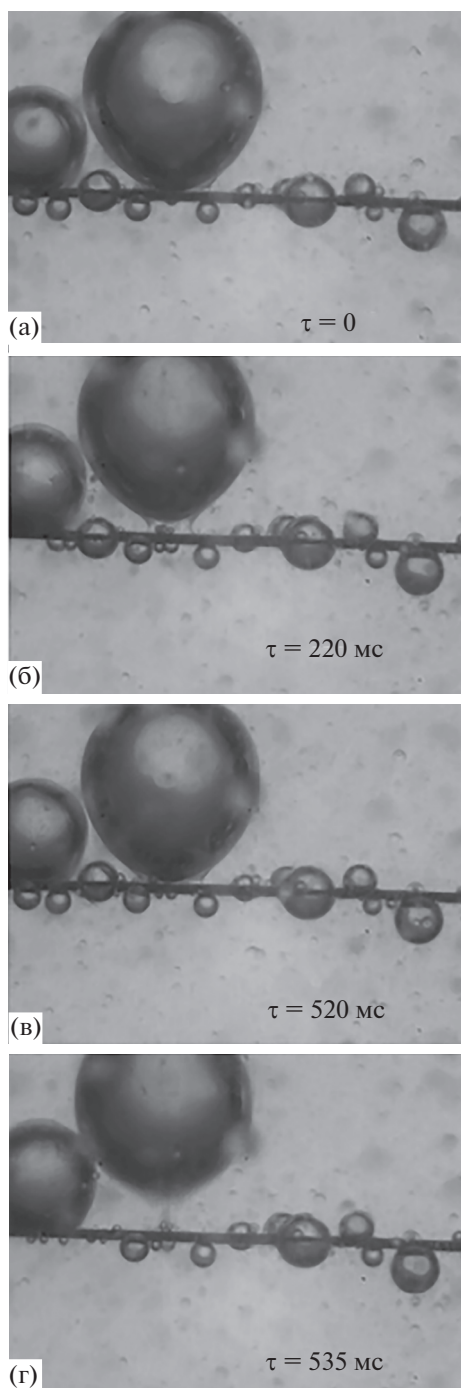


Рис. 4. Отрыв крупного парового пузырька при кипении эмульсии ПЭС-5—вода при $q = 3.2 \text{ МВт/м}^2$.

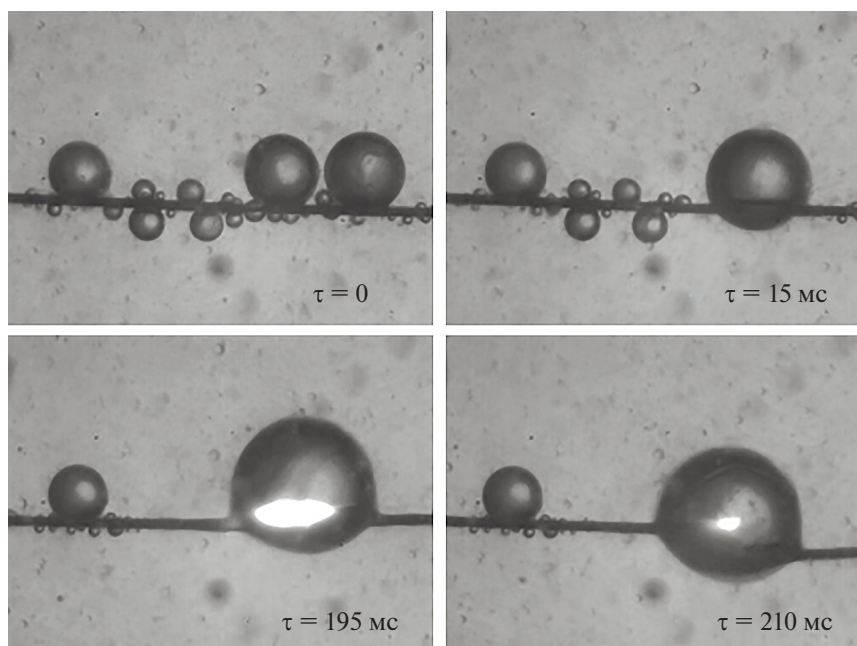


Рис. 5. Динамика перехода от пузырькового кипения к кризису при кипении эмульсии масло ПЭС-5–вода, $q_{кр} = 5.3 \text{ МВт/м}^2$.

кипении эмульсии в проведенных исследованиях [2] существенное влияние оказывал тип используемых ПАВ.

На рис. 1 максимальные значения плотности теплового потока, полученные для воды и эмульсии масло ПЭС-5–вода, соответствуют критическим, превышение которых приводит к разрушению проволочного нагревателя. При критической тепловой нагрузке (рис. 5) на поверхности нагреваемой проволоки при слиянии двух пузырьков образуется крупный пузырь, который обволакивает проволочный нагреватель и препятствует контакту с ней эмульсии. Локальная температура проволоки под паровым пузырем резко растет, что приводит к ее разрушению (пережогу).

Значение критической плотности теплового потока для эмульсии “масло в воде”, как и для эмульсии “вода в масле” [7], оказывается всегда ниже критических тепловых потоков в чистой воде и масле. Рост концентрации масла в эмульсии ведет к снижению критических тепловых потоков $q_{кр}$, а температурный напор ΔT , соответствующий кризису кипения, увеличивается. Следует отметить и весьма узкий температурный интервал режима пузырькового кипения эмульсии масло ПЭС-5–вода, который для эмульсий с концентрациями масла 1.0 и 5.0 об. % составляет около 5°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследован теплообмен при кипении эмульсии масло ПЭС-5–вода на поверхности проволочного нагревателя. С применением

скоростной видеосъемки рассмотрены процессы, протекающие на поверхности нагрева между капельками масла и пузырьками пара, образующимися при кипении воды. Масло имеет низкую теплопроводность по сравнению с водой и играет роль термического сопротивления на границе раздела поверхность нагрева–эмульсия, что приводит к ухудшению теплообмена при конвективном теплообмене и пузырьковом кипении. Рассмотрено влияние концентрации масла в эмульсии на критическую плотность теплового потока. С ростом концентрации масла в эмульсии она снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shadakofsky B.M., Kulacki F.A.* Boiling of Dilute Emulsions. Mechanisms and Applications // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2019. V. 141. P. 1252.
2. *Mori Y.H., Inui E., Komotori K.* Pool Boiling Heat Transfer to Emulsions // *J. Heat Transfer.* 1978. V. 100. P. 613.
3. *Gasarov B.M.* Boiling of Emulsions with a Low-disperse Phase. High-speed Filming // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 94. P. 66.
4. *Snyder N.W., Robin T.T.* Mass-transfer Model in Subcooled Nucleate Boiling // *Trans. ASME. J. Heat Transfer. Ser. C.* 1969. V. 91(3). P. 404.
5. *Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л.* Поведение воздушных пузырей при кипении воды не догретой до температуры насыщения // *ТВТ.* 2012. Т. 50. № 3. С. 436.
6. *Зейгарник Ю.А., Платонов Д.Н., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л.* О природе эмиссии микропузырей при кипении недогретой воды // *ТВТ.* 2012. Т. 50. № 1. С. 83.
7. *Гасанов Б.М.* Ухудшение теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 4. С. 582.