

УДК 536.246

Автоколебательный режим вскипания сильно недогретой жидкости в проточном кольцевом канале*

С.П. Актершев¹, А.А. Левин², И.В. Мезенцев¹, Н.Н. Мезенцева¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск*

E-mail: sergey-aktershev@mail.ru

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования вскипания сильно недогретого этанола в кольцевом проточном канале в условиях импульсного тепловыделения в стенке, охлаждаемой потоком жидкости. В опытах зафиксированы образование паровой оболочки на стенке нагревателя и продолжительные колебания давления в канале большой амплитуды (автоколебательный режим). Разработана математическая модель процесса вскипания этанола, которая учитывает испарение перегретой жидкости вблизи стенки нагревателя и конденсацию пара в потоке недогретой жидкости. Предложенная модель описывает как затухающие колебания парового слоя, так и развитие автоколебательного режима, хорошо предсказывает амплитуду и частоту нелинейных колебаний. Численные расчеты показали, что автоколебательный режим реализуется за счет испарения периодически возобновляемого микрослоя жидкости на стенке нагревателя. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: вскипание, недогретая жидкость, испарение, конденсация, пульсации давления, автоколебания.

Введение

Исследование динамических процессов при вскипании теплоносителя в условиях нестационарного тепловыделения на стенке проточного канала имеет большое значение для многих технических приложений. В первую очередь это связано с обеспечением безопасной и устойчивой работы реакторов разного типа, использующих жидкий теплоноситель. Особую опасность представляет кризис теплоотдачи вследствие быстрого роста температуры охлаждаемой поверхности. Ряд работ [1–6] сосредоточен на изучении процессов возникновения, роста и динамики паровой фазы, которые являются определяющими в таких вопросах как кризис кипения, интенсификация теплообмена. В работах [3–6] исследовалось вскипание сильно недогретой жидкости в условиях импульсного тепловыделения в стенке, были экспериментально зафиксированы пульсации давления, амплитуды которых представляют опасность для работы теплообменных устройств различного назначения в энергетической, криогенной и микроэлектронной технике. В работе [4] с использованием скоростной видеокамеры исследовалось вскипание различных жидкостей (фреона, воды, этилового спирта) в кольцевых каналах. Внутренняя стенка кольцевого канала представляла собой металлическую трубку, подвергаемую

* Работа выполнена по госзаданию (проекты АААА-А17-117022850024-4, АААА-А17-117071800039-1 и АААА-А17-117030310443-5).

импульсному нагреву. Использовались трубки из нержавеющей стали диаметрами 3 и 12 мм длиной 50 и 120 мм. Были измерены зависимости времени ожидания интенсивного роста первичных паровых пузырьков от условий течения, а также получены экспериментальные данные по динамике паровой фазы, эволюции температуры стенки нагревателя и давления в потоке жидкости. В случае вскипания фреона в большом объеме были выявлены режимы с характерными признаками движущегося фронта испарения [7–9] и измерена скорость распространения фронта испарения в зависимости от условий нагрева. В публикации [5] были приведены результаты экспериментального и теоретического исследования процесса вскипания недогретых воды и этанола при импульсном тепловыделении в стенке нагревателя. Опыты по набросам мощности в кольцевом канале, имеющем высоту 1580 мм и длину тепловыделяющей части 300 мм, выявили появление высокоамплитудных пиков давления в сильно недогретой воде при давлении 0,1–0,3 МПа на стадии охлаждения горячей стенки после прекращения действия теплового импульса. Анализ экспериментальных данных по визуализации процесса вскипания позволил выделить несколько характерных стадий: прогрев пристенной области, зарождение и рост паровых пузырьков на поверхности нагревателя, образование и рост паровой оболочки вокруг нагревателя, конденсация пара, повторное смачивание поверхности нагрева. Разрушение образовавшейся паровой оболочки сопровождалось возникновением мощного пика давления амплитудой 7–8 МПа, за которым следовали затухающие пульсации частотой 83 Гц. Во всех случаях в проведенных экспериментах фиксировалось формирование волн давления в канале. Для вскипания воды методом математического моделирования был получен профиль переднего фронта таких волн и рассчитана его амплитуда, удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными.

В экспериментальном исследовании [6] был впервые обнаружен автоколебательный режим при вскипании сильно недогретого этанола, движущегося в кольцевом канале. Были выявлены условия охлаждения нагревателя, при которых пульсация пленки пара на поверхности нагревателя сочетается с появлением областей интенсивного теплосъема. Следует отметить, что эффект развития автоколебаний, описанных в работе [6], наблюдается только в условиях импульсного тепловыделения. В условиях постоянного тепловыделения ядро потока охлаждающей жидкости успевает прогреться, поэтому реализовать значительную величину недогрева жидкости не удастся. В экспериментах, проведенных в работе [6], создавались большие значения недогрева (84–86 К), что приводило к интенсивной конденсации на поверхности паровой пленки и её неустойчивости. Здесь в автоколебательном режиме наблюдались не только пульсации давления, но и крайне высокие значения теплоотдачи (до 10 МВт/м^2), характерные для нестационарных условий при прямом контакте жидкости с горячей металлической поверхностью. Это позволяет сделать вывод о нарушении целостности паровой пленки и непосредственном контакте недогретой жидкости со стенкой нагревателя в процессе автоколебаний.

Неустойчивость паровой пленки и пульсации ее толщины при больших значениях недогрева жидкости были выявлены в экспериментах [10–13], где изучалось поведение паровой пленки на сильно перегретой твердой поверхности, погруженной в большой объем не догретой до температуры насыщения жидкости. Было обнаружено, что при определенных сочетаниях значений температур горячей поверхности и холодной жидкости происходит взрывной сход паровой пленки с пульсациями давления амплитудой десятки килопаскалей и частотой от нескольких единиц до сотни герц. При этом на поверхности раздела пар–жидкость наблюдалось волнообразование в виде стоячих или бегущих волн с амплитудой 100–200 мкм, приближенно равной толщине паровой пленки.

Механизм развития автоколебаний в канале, которые наблюдались в экспериментах [6], в настоящее время представляется весьма схематично. Основная задача настоящей работы — выявить физические факторы, ответственные за развитие автоколебательного режима при вскипании сильно недогретой жидкости в проточном кольцевом

канале. С этой целью на основе разработанной упрощенной математической модели проведено численное моделирование процесса в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

1. Эксперименты с этанолом

1.1. Экспериментальная установка и методика экспериментов

В работе [6] было представлено подробное описание экспериментов с реализацией автоколебательного режима в процессе охлаждения металлической стенки, нагретой до температуры 513 ± 5 К, потоком недогретого этанола. Опыты выполнялись в вертикально ориентированном канале, являющемся частью замкнутого контура, по которому циркулирует жидкость. Контур общим объемом 4 л был оснащен конденсатором с водным охлаждением, центробежным насосом и промежуточным теплообменником для поддержания заданной температуры потока жидкости (схема экспериментального стенда приведена в работе [4]). Использовался рабочий канал (см. рис. 1) длиной 450 мм с квадратным сечением со стороной 18 мм, в центре которого располагалась тепловыделяющая круглая трубка диаметром d из нержавеющей стали X18H10T с медными токоподводами (наружный диаметр — 12 мм, толщина стенки — 1 мм). Канал был оснащен оптически прозрачными окнами и датчиками измерения температуры и давления. Тепловыделение осуществлялось импульсным пропусканием через трубку управляемого трехфазного выпрямленного электрического тока с различной продолжительностью импульса t_{heat} и темпом разогрева стенки порядка 1000 К/с (в условиях экспериментов подавляющее количество выделяющейся теплоты уходило на нагрев стенки трубчатого нагревателя). Все эксперименты выполнялись при давлении в контуре $p_s = 0,3$ МПа и соответствующей температуре насыщения 383 К. Величина недогрева жидкости до температуры насыщения варьировалась в экспериментах от 10 до 135 К, начальная скорость этанола в канале — в диапазоне 0–1,1 м/с. Визуализация процесса осуществлялась цифровой системой VS-FAST при скорости съемки 2000 кадров в секунду. Измерения давления проводились при помощи индуктивных датчиков давления ДД-10, размещенных в нижнем и верхнем сечениях тепловыделяющего канала. Воздействие температурных импульсов на датчик давления было конструктивно исключено. Сигналы датчиков, опрашиваемых с частотой 10 кГц, поступали на быстродействующий АЦП L-761, сопряженный с системой автоматизации для синхронного измерения сигналов. Измерения температуры ядра потока и температуры стенки тепловыделяющей трубки выполнялись погружными хромель-копелевыми термопарами и прикрепленными к внутренней поверхности стенки хромель-алюмелевыми термопарами. Для частотно-временного анализа сигналов датчиков давления было применено разложение сигнала на модальные базисные функции с последующим применением к ним преобразования Гильберта–Хуанга. Такая обработка позволила выделить амплитудную и частотную составляющие сигнала, зависящие от времени.

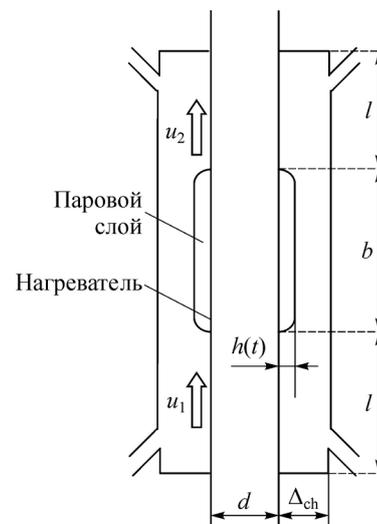


Рис. 1. Схема рабочего канала с паровым слоем толщиной h .

1.2. Образование парового слоя и пульсации давления в канале

На рис. 2 представлена динамика давления в процессе импульсного тепловыделения и последующего охлаждения трубчатого нагревателя потоком недогретого этанола. Величина недогрева жидкости до температуры насыщения T_{sub} составляла 86 К, начальная скорость этанола в канале $u_0 = 0,4$ м/с. При темпе нагрева стенки нагревателя $dT_w/dt = 830$ К/с и продолжительности импульса тепловыделения $t_{\text{heat}} = 0,28$ с температура стенки достигала максимального значения — $T_{\text{max}} = 523$ К. Из рисунка видно, что вскипание этанола сопровождалось затухающими пульсациями давления амплитудой 0,29 МПа и частотой около 35 Гц. Видеосъемка процесса вскипания показала, что сначала на стенке нагревателя появляются отдельные редкие центры активации с быстро растущими пузырями. На границе первичных пузырей образуется фронт испарения, который распространяется по стенке во всех направлениях и оставляет за собой тонкую пленку пара. В результате смыкания паровых пленок от соседних пузырей вся поверхность нагревателя оказывается покрытой паровой оболочкой, которая оттесняет жидкость и препятствует быстрому охлаждению металла. Сопоставление видеосъемки с показаниями термопар и датчиков давления показало, что паровая пленка, полностью покрывающая стенку нагревателя, формируется когда температура нагревателя превышает температуру Лейденфроста (еще до окончания тепловыделения). Высокоамплитудные импульсы давления на рис. 2 объясняются пульсациями объема парового слоя, который периодически расширяется и сжимается за счет испарения перегретой жидкости на стенке и конденсации пара при контакте с недогретой жидкостью в ядре потока. После нескольких циклов колебаний паровая пленка приходит в устойчивое состояние, и дальнейшее охлаждение стенки протекает в беспульсационном режиме. Подобное поведение давления в канале наблюдалось также для процесса вскипания воды [3–5].

На рис. 3а показана эволюция давления в канале для тех же условий, что на рис. 2, но для длительности тепловыделения $t_{\text{heat}} = 0,26$ с (при этом максимальная температура стенки $T_{\text{max}} = 508$ К). В этом случае реализуется автоколебательный режим. Паровая пленка оказывается сильно неустойчивой, и возникают продолжительные, составляющие несколько десятков циклов, пульсации давления частотой 47–53 Гц с нарастающей амплитудой. Длительность нарастания амплитуды составила 0,6 с, при этом амплитуда колебаний давления достигала величины 1,4 МПа. Затем в течение 0,4 с наблюдается затухание пульсаций вследствие значительного охлаждения стенки нагревателя потоком недогретой жидкости. Данные скоростной видеосъемки, сопоставленные с данными датчиков давления, обнаруживают также многократные циклические пульсации объема

парового слоя, которые соответствуют пульсациям давления. Анализ видеок кадров показал, что циклические изменения паровой оболочки во время автоколебательных пульсаций давления носят волновой характер. Фазы сжатия/расширения паровой оболочки начинаются в нижней части канала и распространяются в направлении движения жидкости.

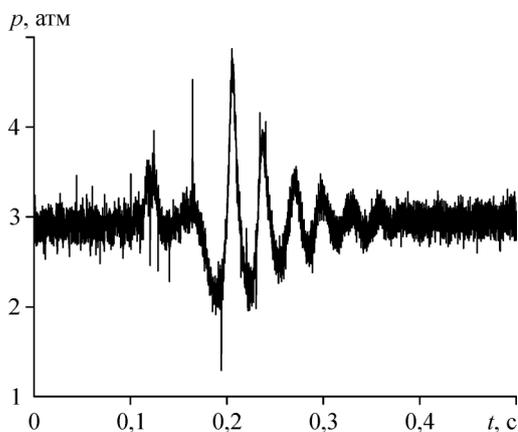


Рис. 2. Динамика давления в этаноле в условиях импульсного тепловыделения. Эксперимент, автоколебательный режим не реализуется.

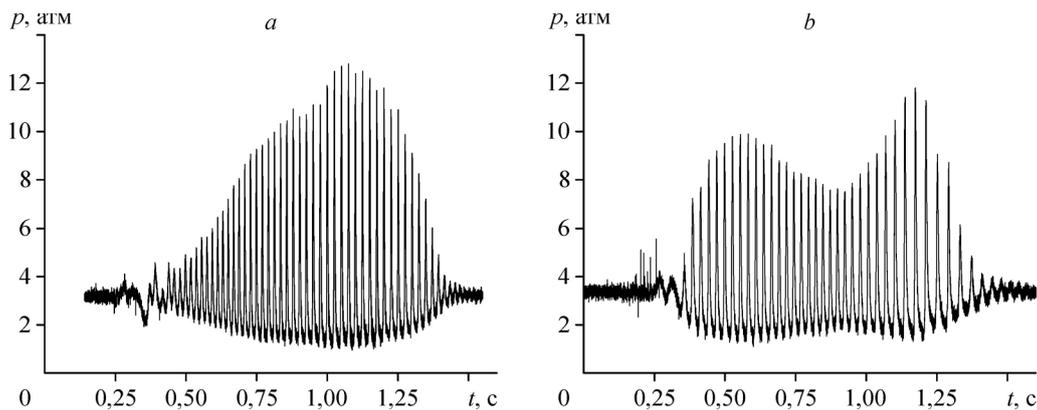


Рис. 3. Динамика давления в этаноле в автоколебательном режиме.

Условия экспериментов: *a* — $u_0 = 0,4$ м/с, $\Delta T_{\text{sub}} = 86$ К, $dT_w/dt = 830$ К/с, $t_{\text{heat}} = 0,26$ с;
b — $u_0 = 0$ м/с, $\Delta T_{\text{sub}} = 84,6$ К, $dT_w/dt = 780$ К/с, $t_{\text{heat}} = 0,28$ с.

Возникновение автоколебательного режима слабо зависит от начальной скорости этанола в канале. Так, например, в исследованном диапазоне скорости (0–1,1 м/с) амплитуда автоколебательных пульсаций давления заметно не изменялась, а длительность пульсаций уменьшалась от 1,5 до 1 с. На рис. 3*b* показана эволюция давления в канале для случая покоящейся жидкости при $T_{\text{sub}} = 84,6$ К, $dT_w/dt = 780$ К/с, $t_{\text{heat}} = 0,28$ с. Из рисунка видно, что амплитуда пульсаций давления в течение 0,3 с растет и достигает величины 0,95 МПа. Далее в течение 0,4 с размах колебаний уменьшается, но затем амплитуда снова нарастает до величины 1,05 МПа, после чего колебания постепенно затухают. Циклическое расширение паровой оболочки происходит вследствие испарения перегретой жидкости вблизи горячей стенки нагревателя, в то время как сжатие паровой оболочки осуществляется вследствие конденсации пара при контакте с сильно недогретой жидкостью в ядре потока. Из-за конденсации масса пара непрерывно уменьшается, следовательно, в процессе автоколебаний действует некий механизм циклической компенсации этой убыли за счет испарения жидкости. По-видимому, при сжатии паровой оболочки нарушается её целостность и на некоторых локальных участках происходит прямой контакт горячей стенки с жидкостью. Об этом свидетельствуют и весьма высокие значения теплоотдачи (до 10 МВт/м²), характерные для прямого контакта жидкости с горячей металлической поверхностью. Так, в экспериментах [14] была установлена роль неустойчивости поверхности паровой пленки и выявлена возможность прямых контактов элементов шероховатостей стенки и воды при температурах стенки выше 573 К. В местах контакта стенки с недогретой жидкостью происходит интенсивное парообразование, при этом количество образующегося пара ограничено длительностью контакта.

Неустойчивость границы раздела пар–жидкость может быть ключевым фактором, обеспечивающим циклическую подпитку массы пара. Межфазная поверхность в реальности не плоская, а покрыта волнами [10, 11]. В фазе сжатия, когда толщина паровой оболочки минимальна, гребни волн могут соприкоснуться с горячей стенкой. Кроме того, с гребней волн могут срываться капли, которые полетят на стенку вследствие развития неустойчивости Рэлея–Тэйлора при большой величине ускорения межфазной поверхности. Таким образом, даже кратковременный локальный контакт холодной жидкости с горячей стенкой вполне способен обеспечить испарение массы жидкости, достаточной для поддержания пульсаций паровой оболочки. Высокая температура стенки нагревателя, по-видимому, обеспечивает быстрое (по сравнению с периодом колебаний) испарение попавшей на стенку жидкости и, тем самым, подпитку массы пара, убывающей из-за конденсации. Подкачка энергии колебаний осуществляется, очевидно, за счет тепловой

энергии стенки нагревателя, поэтому по мере охлаждения стенки интенсивность циклического парообразования снижается, и амплитуда пульсаций постепенно уменьшается до их полного исчезновения.

Импульсное тепловыделение в экспериментах [6] служит лишь способом создания в системе нагреватель–жидкость значительной термической неравновесности в начальный (по отношению к колебательному процессу) момент времени. Этот фактор, по-видимому, является ключевым, поскольку автоколебательный режим наблюдался в узком диапазоне значений температуры недогрева $T_{\text{sub}} = 84\text{--}86\text{ К}$.

2. Теоретическая модель

Для выяснения механизма развития автоколебаний при вскипании недогретой жидкости в проточном канале была разработана упрощенная математическая модель, основанная на следующих предположениях.

2.1. Исходные предположения модели

Для предлагаемой модели приняты следующие исходные положения.

1. Канал с тепловыделяющим трубчатый нагревателем считается колебательной системой с сосредоточенными параметрами. Развитие автоколебаний определяется только геометрическими параметрами канала, физическими свойствами жидкости и условиями тепловыделения.

2. Жидкость считается несжимаемой, ее свойства — постоянными. Пар считается насыщенным и является идеальным газом; зависимость давления пара p_v от его температуры T_v описывается уравнением Клапейрона–Клаузиуса.

3. Сечение канала имеет форму кольца. Величина зазора между внутренней и внешней стенкой Δ_{ch} рассчитывалась по площади проходного сечения реального канала.

4. При вскипании жидкости на всем нагревателе длиной $b = 150\text{ мм}$ мгновенно появляется однородный паровой слой, толщина которого $h(t)$ зависит только от времени.

5. На всем тепловыделяющем участке канала давление является однородным и равно давлению пара $p_v(t)$.

6. Снизу и сверху от нагревателя расположены пробки жидкости одинаковой длины $l = 150\text{ мм}$ (см. рис. 1). Давление на входе в канал p_1 и давление на выходе из канала p_2 считаются постоянными. Значения p_1 и p_2 отличаются от начального давления в канале p_s только за счет гидравлического сопротивления подводящих патрубков ζ .

2.2. Уравнения модели

В начальной стадии процесса, когда паровая фаза еще отсутствует, происходит тепловыделение в стенке трубчатого нагревателя и нагрев прилегающего слоя жидкости. На этой стадии можно считать, что температура стенки T_w растет по закону $T_w(t) = T_l + B_w t$, где B_w — заданный темп нагрева стенки, T_l — температура недогретой жидкости в канале. Поскольку толщина нагретого слоя жидкости мала (порядка 0,1 мм), стенку нагревателя можно считать плоской, при этом распределение температуры жидкости $T(y, t)$ вблизи стенки описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_l \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

с граничными условиями $T|_{y=0} = T_w(t)$, $T|_{y \rightarrow \infty} = T_l$ и начальным условием $T(y, 0) = T_l$, где y — расстояние от стенки. Когда перегрев стенки относительно температуры насыщения достигает некоторого заданного значения ΔT_{cr} , происходит вскипание этанола. В рамках предлагаемой упрощенной модели процессы роста первичных пузырей и рас-

пространения фронта испарения не рассматриваются, в данном случае принимается, что тонкий паровой слой мгновенно образуется на всем нагревателе там, где температура жидкости равна температуре насыщения T_s (давление пара при этом равно давлению в системе p_s). Паровой слой (ПС) имеет две межфазные поверхности: внешняя поверхность контактирует с потоком недогретого этанола, а внутренняя поверхность контактирует с микрослоем перегретой жидкости на стенке трубчатого нагревателя. На внутренней поверхности ПС происходит испарение жидкости в микрослое толщиной $\delta(t)$, а на внешней поверхности ПС имеет место конденсация пара из-за контакта с потоком недогретой жидкости. Начиная с момента появления ПС его толщина h , а также температура пара T_v зависят только от времени.

После окончания импульса тепловыделения стенка нагревателя охлаждается из-за контакта с микрослоем перегретой жидкости. Если считать профиль температуры в испаряющемся микрослое линейной функцией координаты y , то изменение температуры стенки описывается уравнением

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\rho_l c_l a_l}{\rho_w c_w \Delta_w} \frac{(T_v - T_w)}{\delta}, \quad (2)$$

а изменение толщины микрослоя — уравнением

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{c_l a_l}{L} \frac{(T_v - T_w)}{\delta}. \quad (3)$$

Начиная с момента образования ПС оказывает динамическое воздействие на движение жидкости в канале. Изменение давления пара $p_v(t)$ приводит к изменению скоростей жидких пробок u_1 и u_2 в соответствии с уравнениями движения

$$\rho_l l \frac{du_1}{dt} = p_1 - p_v - \zeta \frac{\rho_l u_1 |u_1|}{2}, \quad (4)$$

$$\rho_l l \frac{du_2}{dt} = p_v - p_2 - \zeta \frac{\rho_l u_2 |u_2|}{2}, \quad (5)$$

В свою очередь, значения u_1 и u_2 связаны с изменением толщины ПС уравнением

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Delta_{ch}}{b} (u_2 - u_1), \quad (6)$$

которое представляет собой условие несжимаемости жидкости в канале.

Давление пара, изменяющееся как вследствие фазового превращения, так и вследствие изменения объема пара $V = \pi d \cdot b \cdot h(t)$, можно определить из уравнения баланса массы пара

$$\frac{d(\rho_v V)}{dt} = \frac{V}{h} (q_2 + q_1),$$

здесь $q_2 = \frac{\lambda_l}{L} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}$ и $q_1 = \frac{\lambda_l}{L} \cdot \frac{(T_w - T_v)}{\delta}$ — плотности потока массы на внешней и на внутренней поверхностях ПС ($q_1 > 0$, $q_2 < 0$) соответственно, L — теплота испарения, z — расстояние от внешней поверхности ПС вглубь потока жидкости. Уравнение баланса массы пара можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{d\rho_v}{\rho_v dt} + \frac{dh}{h dt} = \frac{\rho_l c_l a_l}{\rho_v h L} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{T_w - T_v}{\delta} \right). \quad (7)$$

Уравнение Клапейрона–Клаузиуса для пара будет иметь вид

$$\frac{dT_v}{dp_v} = \frac{T_v}{\rho_v L}, \quad (8)$$

а уравнение состояния идеального газа —

$$p_v = R_v \rho_v T_v, \quad (9)$$

здесь R_v — газовая постоянная. Из выражений (8) и (9) получим зависимость давления насыщенного пара от температуры:

$$p_v = p_s \exp\left(\frac{L}{R_v T_s} - \frac{L}{R_v T_v}\right). \quad (10)$$

Используя (6), (8) и (9), преобразуем уравнение (7) к следующему виду:

$$\frac{dT_v}{T_v dt} = \frac{\kappa}{h} \left(\frac{\Delta_{ch}}{b} (u_1 - u_2) + \frac{\rho_l c_l a_l}{\rho_v L} J \right), \quad (11)$$

здесь $\kappa = (L/R_v T_v - 1)^{-1}$. Переменная $J = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + \frac{T_w - T_v}{\delta}$ характеризует результирующую

поток массы в ПС (первое слагаемое учитывает конденсацию, второе — испарение микрослоя). Уравнение (11) связывает изменение температуры пара с движением жидких пробок и с интенсивностью испарения и конденсации. Градиент температуры $\partial T/\partial z$ на внешней поверхности ПС вычисляется из решения следующей классической задачи теплоотдачи к потоку движущейся жидкости.

Пусть жидкость с температурой T_l движется со скоростью u вдоль плоской поверхности, температура которой равна T_v . Температурное поле в жидкости $T(x, z)$ описывается уравнением

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = a_l \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

с граничными условиями $T(0, z) = T_b$, $T|_{z=0} = T_v$, $T|_{z \rightarrow \infty} = T_l$. Эта задача имеет решение (см. [15]) в виде

$$T = T_v + \sqrt{\frac{2}{\pi}} (T_l - T_v) \int_0^{\frac{z\sqrt{u}}{\sqrt{2a_l x}}} \exp(-\eta^2/2) d\eta.$$

Отсюда находим локальный градиент температуры $\partial T/\partial z$ на поверхности $z = 0$, а также средний по длине нагревателя градиент температуры

$$\left\langle \frac{\partial T}{\partial z} \right\rangle = \frac{1}{b} \int_0^b \frac{\partial T}{\partial z} dx = \frac{2(T_l - T_v)}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{u}{a_l b}}. \quad (12)$$

Поскольку скорости жидких пробок u_1 и u_2 различны, в (12) используется средняя скорость $\langle u \rangle$.

Таким образом, система обыкновенных дифференциальных уравнений (2)–(6), (11) вместе с замыкающими соотношениями (10), (12) и с уравнением в частных производных (1) позволяет провести численное моделирование теплогидравлических процессов с фазовыми превращениями, происходящих при вскипании недогретой жидкости в кольцевом канале в условиях импульсного нагрева.

3. Результаты численного моделирования

3.1. Моделирование вскипания этанола и образования и парового слоя

Система уравнений (2)–(6), (11) решалась численно конечно-разностным методом по неявной схеме с итерациями. Для старта итераций в правые части уравнений подставлялись величины, полученные в предыдущий момент времени. Уравнение (1) решалось конечно-разностным методом по неявной схеме (температура вычислялась методом прогонки с использованием граничных условий на стенке и в недогретой жидкости). Была проведена серия расчетов для условий экспериментов [6], в которых варьировались свободные параметры модели (критическое значение перегрева стенки ΔT_{cr} и начальная толщина парового слоя h_0). На рис. 4–6 приведены результаты расчета для условий эксперимента, показанного на рис. 2. На рис. 4 показано распределение температуры в жидкости вблизи стенки нагревателя на момент вскипания $t = 0,132$ с. Появление ПС задавалось условием, что перегрев стенки достигает значения $\Delta T_{cr} = 25$ К. Начальное положение ПС показано на рисунке штриховой линией. Видно, что на момент появления ПС жидкость вблизи стенки нагревателя прогревается на глубину менее 0,3 мм, при этом ПС образуется на расстоянии 0,02 мм от стенки нагревателя. На рис. 5 показана рассчитанная толщина ПС в зависимости от времени. Видно, что сразу же после появления ПС его толщина быстро растет от начального значения $h_0 = 0,1$ мм до значения 3,75 мм. Затем превалирует конденсация, сопровождаемая затухающими колебаниями, после чего наступает термический режим (монотонное уменьшение толщины ПС) до полного исчезновения паровой фазы. Рисунок 6 демонстрирует эволюцию давления (рис. 6а) и толщины (рис. 6б) жидкого микрослоя на стенке нагревателя. Из рис. 6а видно, что начальное расширение ПС сопровождается коротким всплеском давления амплитудой 0,05 МПа и последующим ростом давления до величины 0,42 МПа вследствие притока массы из испаряющегося жидкого микрослоя. В момент времени 0,156 с микрослой полностью исчезает (см. рис. 6б) и приток массы в ПС прекращается. В этот момент давление пара из-за конденсации резко падает (см. рис. 6а), вследствие чего начинаются пульсации скорости жидких пробок и, соответственно, пульсации объема и давления пара. Амплитуда и частота рассчитанных колебаний давления в канале хорошо согласуются с экспериментальными данными, показанными на рис. 2.

Многочисленные расчеты, в которых варьировались параметры ΔT_{cr} и h_0 , показали, что во всех случаях начальный микрослой на стенке нагревателя полностью испаряется за время порядка 0,1 с. После этого в течение 0,2–0,3 с происходит полная конденсация ПС,

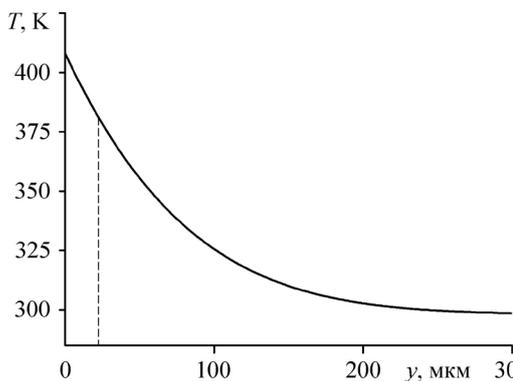


Рис. 4. Распределение температуры в жидкости вблизи стенки нагревателя на момент вскипания.

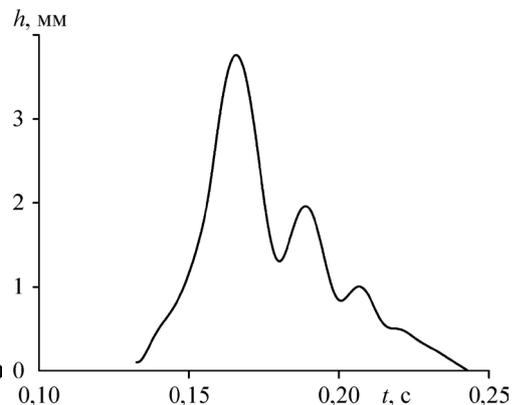


Рис. 5. Расчетная эволюция толщины парового слоя. Расчет для условий, показанных на рис. 2.

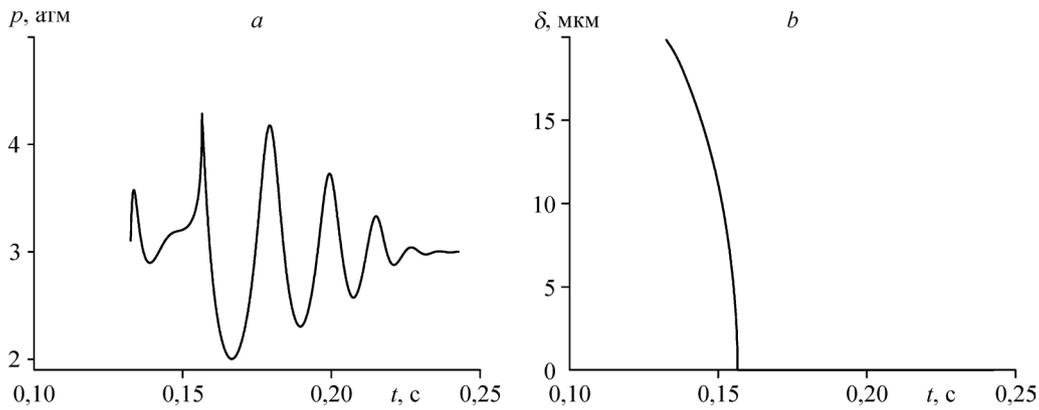
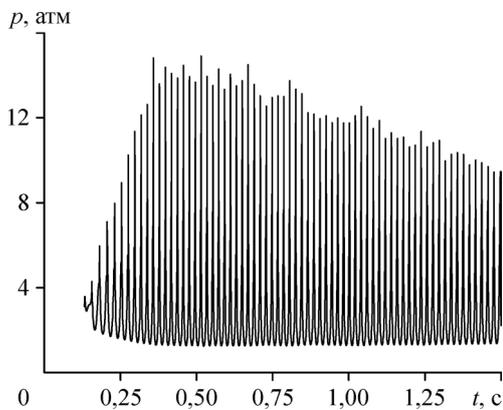


Рис. 6. Расчетная эволюция давления (а) и толщины микрослоя (b).
 Расчет для условий, показанных на рис. 2.

сопровождаемая затухающими осцилляциями давления с амплитудой 0,1–0,15 МПа. Во всех случаях автоколебательный режим не реализуется.

3.2. Моделирование автоколебательного режима

Очевидно, что развитие автоколебаний возможно только за счет испарения жидкости, попадающей на стенку нагревателя. Разработанная модель была модернизирована с целью учета возможности прямого контакта жидкости с горячей стенкой в процессе пульсаций ПС. Попадание жидкости на горячую стенку учитывалось на основе следующих представлений. Вследствие развития неустойчивости внешняя поверхность ПС не будет плоской из-за покрытия ее волнами, амплитуда которых имеет порядок минимальной толщины ПС. В те моменты времени, когда толщина ПС минимальная, гребни волн соприкасаются с горячей стенкой. Кроме этого, в заключительной фазе сжатия ускорение внешней поверхности ПС направлено в сторону жидкости. Достаточно большая величина этого ускорения (для условий на рис. 5 наблюдались значения порядка 100 м/с^2) обеспечивает развитие на межфазной поверхности неустойчивости Рэлея–Тэйлора и отрыв капель, летящих на стенку. В численном алгоритме оба механизма попадания жидкости на горячую стенку описывались следующим упрощенным образом. В тот момент, когда толщина ПС достигает минимума (в каждом цикле колебаний), на стенке нагревателя мгновенно возобновляется микрослой жидкости заданной толщины δ_* порядка нескольких микрон.



На рис. 7–9 показаны результаты расчетов режима автоколебаний для экспериментальных условий, указанных на рис. 3а, при заданных значениях $\Delta T_{\text{ст}} = 25 \text{ К}$, $h_0 = 0,1 \text{ мм}$, $\delta_* = 6 \text{ мкм}$. На рис. 7 показана динамика давления в канале. Видно, что циклическое возобновление жидкого микрослоя приводит к раскачке колебаний. Амплитуда пульсаций давления в течение 0,4 с растет и достигает

Рис. 7. Автоколебания давления в канале.
 Расчет для условий, показанных на рис. 3а.

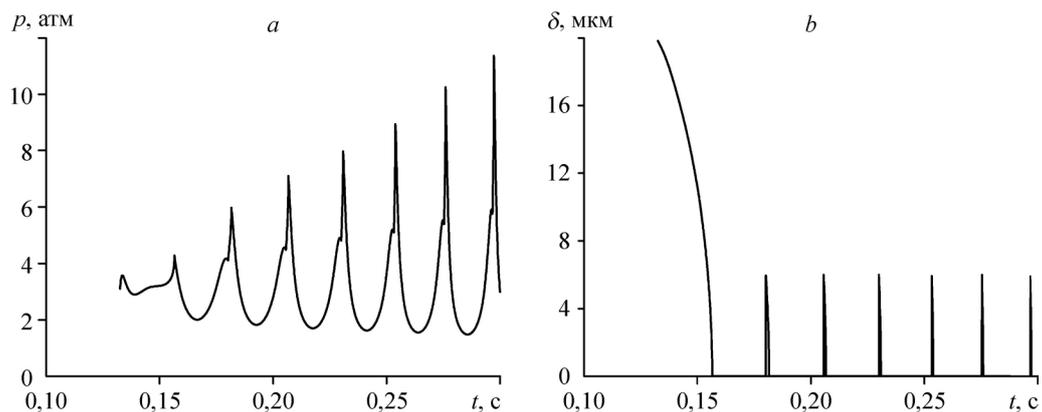


Рис. 8. Развитие автоколебаний вследствие испарения возобновляемого жидкого микрослоя. Эволюция давления (а) и толщины микрослоя на стенке (b).

максимального значения 1,35 МПа, после чего постепенно уменьшается из-за медленного остывания стенки нагревателя. Полученные в расчете амплитуда и частота колебаний (45–50 Гц) хорошо согласуются с экспериментальными данными, показанными на рис. 3. Рисунок 8 демонстрирует стадию развития автоколебаний: на рис. 8а показана эволюция давления, а на рис. 8b — эволюция жидкого микрослоя на стенке нагревателя. Из рис. 8а видно, что после испарения начального микрослоя толщиной 20 мкм (см. рис. 8b) в каждом цикле сжатия на пике давления появляется короткий «всплеск». Этот «всплеск» давления обусловлен появлением притока пара из испаряющегося жидкого микрослоя. Возобновляемый микрослой толщиной 6 мкм, появляющийся в моменты минимальной толщины ПС, полностью испаряется в течение 0,001–0,0014 с, что существенно меньше периода колебаний (см. рис. 8b). В результате действия таких «всплесков» давления амплитуда колебаний растет и выходит на стационарный уровень, близкий к наблюдаемому в экспериментах. На рис. 9 изображены пульсации массы пара в ПС, соответствующие расчету, показанному на рис. 3. Рисунок 9а демонстрирует, что в первых двух–трех циклах колебаний наблюдается пик пульсаций массы пара, а затем в течение примерно 0,3 с средняя за период масса пара уменьшается и устанавливается почти стационарный уровень пульсаций. На рис. 9b стадия установления показана более подробно. Видно, что в каждом цикле колебаний сразу же после появления на стенке нагревателя возобновляемого микрослоя жидкости наблюдается скачкообразное увеличение массы пара вследствие быстрого испарения возобновляемого микрослоя (см. рис. 8b). После этого масса пара из-за конденсации непрерывно уменьшается до начала следующего цикла колебаний.

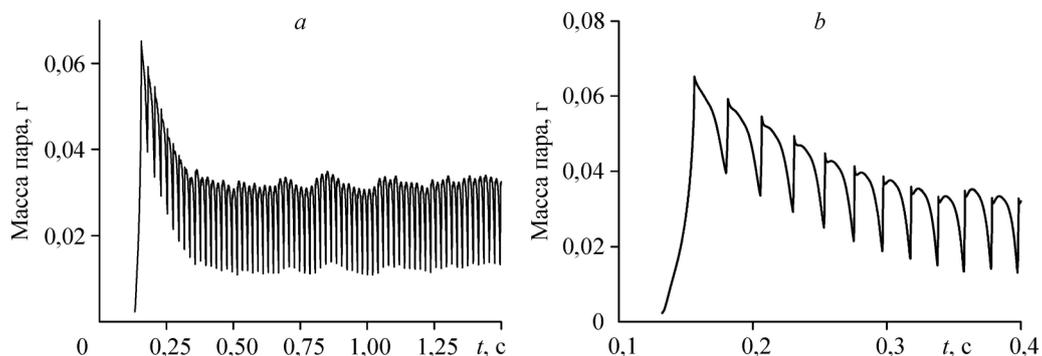


Рис. 9. Изменение массы пара в режиме автоколебаний (а) и на стадии развития автоколебаний (b). Расчет для условий, показанных на рис. 3а.

Постепенно устанавливается некоторое среднее за цикл значение массы пара, которое является результатом баланса процессов конденсации и испарения возобновляемого микрослоя.

В расчетах варьировались параметры модели u_0 , $\Delta T_{ст}$, h_0 , δ_* . Вычисления показали, что величина начальной скорости этанола практически не влияет на условия развития автоколебаний, что согласуется с опытными данными. Этот факт вполне понятен, поскольку величина пульсации скорости, определяющая интенсивность конденсации пара в потоке недогретой жидкости, существенно превышает величину u_0 . Варьирование значений $\Delta T_{ст}$ в диапазоне 10–30 К и значений h_0 в диапазоне 0,1–0,5 мм показало, что эти параметры оказывают некоторое влияние только на стадию развития автоколебательного режима, но слабо влияют на амплитуду и частоту установившихся автоколебаний. Значения параметра δ_* , напротив, оказывают сильное влияние на уровень пульсаций. В исследованном диапазоне значений толщины (1–20 мкм) возобновляемый жидкий микрослой успевает полностью испариться за время, много меньшее периода колебаний. Уменьшение значения δ_* (т.е. подпитки массы пара) приводит к снижению средней за период (а также минимальной) массы пара. Уменьшение минимальных значений массы пара в ПС приводит к росту амплитуды пиков давления.

Отметим также, что наличие возобновляемого жидкого микрослоя приводит к существенному росту величины ускорения межфазной поверхности d^2h/dt^2 в те моменты времени, когда толщина ПС минимальна. Так, например, в расчетах, результаты которых показаны на рис. 7–9, величина ускорения (в установившемся автоколебательном режиме) достигала 200–220 м/с². Такое высокое значение ускорения гарантированно обеспечивает срыв с межфазной поверхности летящих на стенку капель.

Заключение

Разработана упрощенная математическая модель, которая описывает вскипание сильно недогретой жидкости в канале в условиях импульсного тепловыделения в стенке нагревателя и последующее ее охлаждение потоком жидкости. Модель описывает появление паровой фазы в виде тонкого парового слоя на стенке нагревателя, и последующие его пульсации, зафиксированные в экспериментальных работах [3–6]. В разработанной модели проточный канал рассматривается как колебательная система с сосредоточенными параметрами, в которой сжимаемый паровой слой играет роль пружины, а инерционная масса обусловлена пробками чистой жидкости, расположенными выше и ниже нагревателя.

В численных расчетах показано, что автоколебательный режим, экспериментально обнаруженный в работе [6], реализуется за счет испарения периодически возобновляемого микрослоя жидкости на стенке нагревателя в каждом цикле колебаний. Модель описывает развитие автоколебаний, хорошо предсказывает амплитуду и частоту установившихся колебаний давления в канале. Высокая амплитуда продолжительных нелинейных колебаний поддерживается на фоне баланса процессов конденсации и испарения в течение одного периода колебаний.

Список обозначений

a_l — температуропроводность жидкости, м ² /с,	T_{max} — максимальная температура стенки, К,
B_w — температура нагрева стенки, К/с,	T_{sub} — температура недогрева жидкости до температуры насыщения, К,
b — длина нагревателя, м,	T_s — температура насыщения, К,
h — толщина парового слоя, м,	T_w — температура стенки, К,
h_0 — начальная толщина парового слоя, м,	T_v — температура пара, К,
L — удельная теплота парообразования, Дж/кг,	T_l — температура недогретой жидкости в канале, К,
l — длина пробки жидкости, м,	

p_v — давление пара, Па,	u_0 — начальная скорость жидкости в канале, м/с,
p_s — давление насыщения, Па,	y — расстояние от стенки, м,
p_1 — давление на входе в канал, Па,	z — расстояние от внешней поверхности парового слоя, м,
p_2 — давление на выходе из канала, Па,	δ — толщина жидкого микрослоя на стенке, м,
q_1 — плотность потока массы на внутренней поверхности парового слоя, кг/(с·м ²),	δ_* — толщина периодически возобновляемого микрослоя, м,
q_2 — плотность потока массы на внешней поверхности парового слоя, кг/(с·м ²),	ζ — гидравлическое сопротивление подводящих патрубков,
R_v — газовая постоянная, Дж/(кг·К),	Δ_{ch} — расстояние между внутренней и внешней стенкой канала, м,
t — время, с,	ΔT_{cr} — критическое значение перегрева стенки, К.
t_{heat} — продолжительность импульса тепловыделения, с,	

Список литературы

1. Okuyama K., Mori S., Sawa K., Iida Y. Dynamics of boiling succeeding spontaneous nucleation on a rapidly heated small surface // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. Vol. 49. P. 2771–2780.
2. Zhao Z., Glod S., Poulikakos D. Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. Vol. 43. P. 281–296.
3. Покусаев Б.Г., Казенин Д.А., Таиров Э.А., Чижиков С.А. Моделирование ударных процессов при аварийном набросе мощности в сборке твэлов // Теплоэнергетика. 1999. № 3. С. 53–62.
4. Pavlenko A.N., Tairov E.A., Zhukov V.E., Levin A.A., Moiseev M.I. Dynamics of transient processes at liquid boiling-up in the conditions of free convection and forced flow in a channel under nonstationary heat release // J. Engng Thermophys. 2014. Vol. 23, No. 3. P. 173–193.
5. Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Таиров Э.А. Моделирование вскипания недогретых воды и этанола в условиях импульсного тепловыделения в стенке // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 1. С. 89–95.
6. Левин А.А., Таиров Э.А., Спириев В.А. Автоколебательные пульсации давления в этаноле при захлаживании нагревателя // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1. С. 61–72.
7. Актершев С.П., Овчинников В.В. Модель вскипания сильно перегретой жидкости с формированием фронта испарения // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 4. С. 617–628.
8. Актершев С.П., Овчинников В.В. Модель стационарного движения межфазной поверхности в слое сильно перегретой жидкости // Прикл. механика и технич. физика. 2008. Т. 49, № 2. С. 47–55.
9. Павленко А.Н., Лель В.В. Приближенная расчетная модель самоподдерживающегося фронта испарения // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 1. С. 111–124.
10. Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А. Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43, № 1. С. 100–114.
11. Ивочкин Ю.П., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Кубриков К.Г. К вопросу об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 4. С. 475–481.
12. Ягов В.В., Забиров А.Р., Лексин М.А. Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 70–80.
13. Kanin P.K., Ryzantsev V.A., Lexin M.A., Zabirov A.R., Yagov V.V. Heat transfer enhancement at increasing water concentration in alcohol in the process of non-stationary film boiling // J. of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 980. P. 012029-1–012029-5.
14. Bradfield W.S. Solid-liquid contact in stable film boiling // Industrial Engng. Chemistry Fundamentals. 1966. No. 5. P. 200–204.
15. Грановский В.С., Сулацкий А.А. Пленочное кипение недогретой жидкости при вынужденном обтекании пластины // Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 33, № 4. С. 625–627.

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2018 г.,
после доработки — 26 июня 2018 г.