

УДК 536.423; 537.312.67

Переходные режимы вскипания струй перегретой воды^{*}

**А.В. Решетников, К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков,
В.П. Коверда**

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: reshav@itp.uran.ru

Проведено экспериментальное исследование истечения перегретой воды из камеры высокого давления через короткие цилиндрический и щелевой каналы. Установлена связь механизмов парообразования в перегретой жидкости (вскипания на единичных, не взаимодействующих центрах, интенсивного гетерогенного парообразования, гомогенного флуктуационного зародышеобразования) с соответствующими формами струи перегретой воды. Определены температурные интервалы, в которых наблюдались переходные режимы вскипания. Показано, что в переходных режимах вскипания наблюдается возрастание амплитуды пульсаций параметров струи и в спектрах мощности пульсаций появляется низкочастотная $1/f$ составляющая.

Ключевые слова: перегретая жидкость, частота зародышеобразования, переходные режимы вскипания, формы струи, $1/f$ флуктуации.

Введение

Использование предельных и критических тепловых нагрузок в современном энергетическом оборудовании приводит к тому, что жидкие теплоносители оказываются в неравновесном или метастабильном состояниях с пониженной устойчивостью. В сильно перегретой метастабильной жидкости фазовое превращение может происходить по механизму взрывного вскипания, которое сопровождается выделением значительного количества энергии, что может приводить к гидравлическим ударам и нарушению технологических режимов. Актуальной задачей является установление закономерностей и характеристик взрывного вскипания в перегретой жидкости при глубоких заходах в область метастабильных фазовых состояний в условиях интенсивного тепловыделения, приводящего к паровому взрыву.

Глубокий заход в область метастабильных фазовых состояний может осуществляться при быстром сбросе давления в жидкости, в частности, при истечении вскипающей жидкости из сосудов высокого давления через короткие каналы в атмосферу [1–8]. При начальных параметрах жидкости, близких к термодинами-

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-00002-а), Программы фундаментальных исследований, выполняемых в учреждениях УрО РАН совместно с организациями СО РАН (№ 09-С-2-1007) и Проекта ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН (№ 10-2-41-БЯ).

ческой критической точке, перегревы могут достигать предельных значений и в потоке могут реализовываться условия интенсивного гомогенного парообразования [1–4].

Условия взрывного вскипания теплоносителя могут реализовываться при аварийных ситуациях с образованием течи в трубопроводе или сосуде высокого давления. Актуальность исследования критических режимов истечения и взрывного вскипания в потоках перегретой жидкости связана с проблемой безопасности элементов энергетического оборудования, в частности, с задачами описания разрыва элементов охлаждающих систем, применительно к запросам атомной энергетики, криогенной техники, экологии.

Наряду с негативными последствиями, быстрая разгерметизация находит применение как высокоэффективный способ для мелкодисперсного распыления различных веществ и топлив. Взрывное вскипание нашло эффективное практическое приложение в новой технике пожаротушения, где в качестве противопожарного агента используется горячая вода. Также в противопожарной технике используется эффект полного развала струи при взрывном вскипании перегретой воды [9].

Потоки вскипающей жидкости характеризуются значительными пульсациями параметров. Проведенные ранее экспериментальные исследования динамики и эволюции случайных пульсаций в переходных режимах теплопереноса с высокоинтенсивными фазовыми превращениями привели к обнаружению динамических режимов со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте ($1/f$ шум) [10]. Характерная черта таких режимов заключается в том, что значительная часть энергии пульсаций связана с очень медленными процессами, это свидетельствует о возможности крупномасштабных выбросов в системе. Пульсации с $1/f$ спектром мощности были обнаружены в кризисных и переходных режимах кипения, при акустической кавитации, в колебательных режимах горения, при дуговом электрическом разряде. Возникновение таких пульсаций связывается с одновременным протеканием различных неравновесных фазовых переходов в сложных системах с развитой флуктуационной природой [11].

В работах [12–15] пульсации с $1/f$ спектром мощности были обнаружены при вскипании струй воды и органических жидкостей, истекающих в атмосферу из камеры высокого давления через короткие цилиндрические каналы. При наличии за выходным срезом канала плоскости, перпендикулярной его оси, в условиях взрывного вскипания наблюдается полное раскрытие струи, переход к которому сопровождается интенсивными пульсациями. Спектр мощности таких пульсаций имеет $1/f$ составляющую, что означает возможность крупномасштабных низкочастотных выбросов во вскипающем потоке.

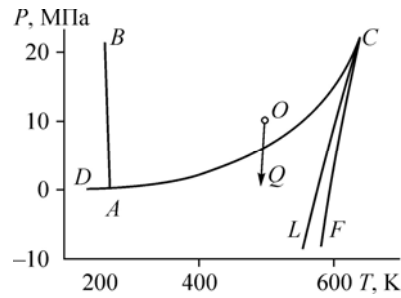
С увеличением степени перегрева жидкости происходит смена механизмов парообразования в струе горячей жидкости, которая приводит к изменениям характеристик и структур потока. При аварийной разгерметизации трубопроводов и сосудов высокого давления с горячей жидкостью образуются отверстия различной формы. Геометрические характеристики разрывов могут оказывать существенное влияние на характеристики вскипающих потоков. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование вскипающих струй воды при истечении из камеры высокого давления через каналы различной формы (цилиндрические и щелевые), установление связи формы струи с механизмом парообразования и определение спектральных характеристик пульсаций в переходных режимах.

Механизмы парообразования в перегретой воде

Процесс истечения горячей воды через короткие каналы при разгерметизации камеры высокого давления сопровождается глубоким заходом жидкости в область

Рис. 1. Фазовая диаграмма воды.

AB — линия плавления, AC — кривая фазового равновесия или бинодаль, CL — линия достижимых перегревов, CF — граница термодинамической устойчивости или спинопаль, C — критическая точка.



метастабильных (перегретых) состояний. В метастабильном состоянии время жизни жидкости конечно, и кинетика вскипания определяется вероятностью фазового превращения, которое задается частотой зародышеобразования J или средним временем жизни $\bar{\tau}$ данного объема жидкости V . Известно, что для больших скоростей роста паровых пузырей между J , V и $\bar{\tau}$ существует простая связь: $JV\bar{\tau} = 1$ [1]. На рис. 1 показано изменение параметров жидкости на входном участке короткого канала и внедрение в метастабильную область (изоэнтропа OQ) при резком сбросе давления при истечении из рабочей камеры в атмосферу. Экспериментальные исследования кинетики парообразования показали, что частота зародышеобразования J в метастабильной области изменяется неравномерно [16]. Теория гомогенной нуклеации [1] предсказывает весьма низкие значения частоты при малых и умеренных перегревах жидкости, но с увеличением степени метастабильности при температурах $T > 0,9T_C$, где T_C — температура термодинамической критической точки, интенсивность J сильно возрастает.

Экспериментальные исследования по кинетике зародышеобразования свидетельствуют, что в действительности при малых и умеренных перегревах частоты J не так малы, как полагается в теории, а при предельных перегревах ($T \sim 0,9T_C$) теоретические значения J и экспериментальные данные находятся в весьма неплохом согласии. Из опытов следует, что для воды зависимость частоты зародышеобразования J от температуры при атмосферном давлении носит ступенчатый характер (рис. 2). Так, если температура $T < 0,7T_C$, то частота $J \sim 10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$ и парообразование происходит на отдельных немногочисленных и невзаимодействующих пузырьках — так называемых готовых центрах кипения [16]. В температурном интервале от $0,7T_C$ до $0,9T_C$ частота парообразования пороговым образом возрастает до значений $J \sim 10^8 \div 10^{13} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$. Такой рост частоты обусловлен не только увеличением пересыщения, но и переходом к интенсивному гетерогенному парообразованию. Этот механизм связан с возрастанием количества центров кипения, то есть зарождением паровой фазы на внешних включениях в жидкости (твердые частицы, растворенный газ, микроуглубления на поверхности сосуда и т. д.). При интенсивном гетерогенном зародышеобразовании часто наблюдается цепная лавинообразная активация центров кипения. С достижением температур $T \geq 0,9T_C$ вступает в действие механизм гомогенного зародышеобразования и реализуются частоты $J \approx 10^{20} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$. Отличительной особенностью для двух последних упомянутых

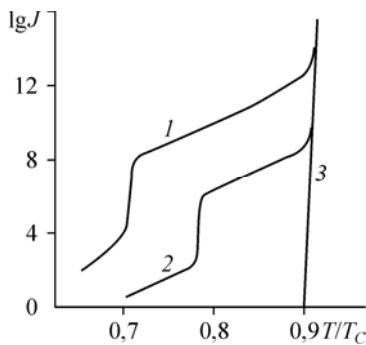


Рис. 2. Температурная зависимость частоты зародышеобразования в перегретых жидкостях при атмосферном давлении.

1, 2 — аппроксимация экспериментальных результатов, полученных для воды (1) и для органических жидкостей (2), 3 — расчет по теории гомогенной нуклеации.

механизмов вскипания является тот факт, что при этом образуется совокупность взаимодействующих “когерентных” пузырьков. Скачок на четыре порядка J для воды при $T/T_C = 0,7$ и рост частоты зародышеобразования при $T/T_C = 0,9$ объясняются переходными режимами вскипания. Переходы между режимами вскипания с различными механизмами зародышеобразования в перегретых жидкостях можно интерпретировать как неравновесные фазовые переходы.

Аналогичное поведение центров парообразования наблюдается и у некоторых органических жидкостей (предельные углеводороды, спирты, фреоны). Но есть некоторые отличия. В частности, они выражаются в более низких значениях частоты $J \sim 10^6 \div 10^9 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$ и в более узком температурном интервале для интенсивного гетерогенного зародышеобразования — от $0,8 T_C$ до $0,9 T_C$ (см. рис. 2).

Формы струи перегретой воды при истечении через короткие каналы

Цилиндрический канал. Экспериментальное изучение переходных режимов вскипания в струях перегретой воды и форм струй было проведено на лабораторной установке, обеспечивающей стационарный режим истечения в течение 10–100 с. Истечение происходило в воздушную среду, находящуюся при атмосферном давлении. Рабочая камера представляла собой цилиндрический стакан объемом 1 л, выполненный из нержавеющей стали. Конструкция рабочей камеры позволяла проводить опыты в интересующем нас интервале начальных температур от 400 до 600 К при изменении давления в камере до 15 МПа. Отпирание и запираание входного участка рабочего канала производилось изнутри камеры с помощью штока с уплотнением по типу конус–цилиндр. Такое исполнение запирающего устройства давало широкие возможности в изменении геометрических условий за выходом из канала. Варьирование выходной конфигурации осуществлялось посредством изменения конфигурации прижимных фланцев, уплотняющих исследуемый канал с рабочей камерой. Геометрические характеристики этих фланцев приведены в статье [17]. В опытах по истечению, в термодинамически сильно неравновесном режиме, использовались короткий цилиндрический канал с отношением длины к диаметру $l/d = 1,4$ при диаметре $d = 0,5$ мм и щелевой канал с шириной $b = 0,2$ мм и высотой $h = 4$ мм. Длины каналов одинаковы: $l = 0,7$ мм. Для исключения влияния внешних геометрических условий за выходным срезом цилиндрического канала в опытах использовался канал, выполненный на свободном конце переходного патрубка (по типу “пяточка”).

Рассмотрим формы струй воды при различных перегревах. На рис. 3 представлены фотографии струй вскипающей воды при истечении с линии насыщения через цилиндрический канал. Можно выделить несколько видов форм струй, соответствующих различным механизмам их разрушения. При перегревах $\Delta T = T_{0s} - T_s(p_a) < 50 \text{ К}$ (p_a — атмосферное давление) и частотах образования пузырьков пара на гетерогенных (легко активируемых) центрах кипения $J < 10^2 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$ на фотографиях струй не обнаруживаются даже отдельные пузыри на расстояниях равных нескольким десяткам сантиметров.

При перегревах в интервале $50 \text{ К} < \Delta T < 80 \text{ К}$ экспериментально определенные частоты зародышеобразования находятся в диапазоне $10^2 \text{ с}^{-1} \text{ см}^3 < J < 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$, и уже заметно влияние фазовых превращений на форму струи. Механизм разрушения струи при этих перегревах преимущественно связан с барокапиллярной неустойчивостью поверхности струи, обусловленной интенсивным испарением с поверхности струи [16]. Воздействие двух указанных механизмов

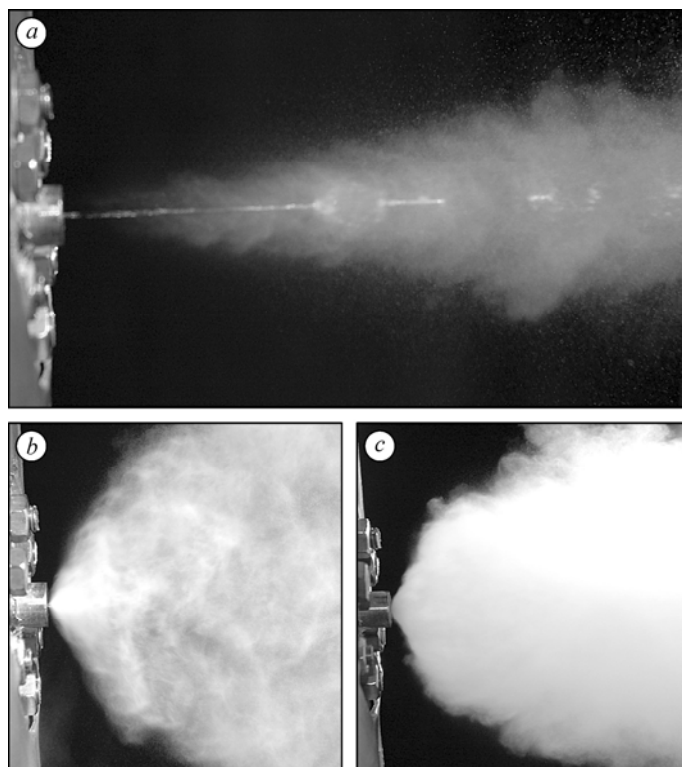


Рис. 3. Формы струй вскипающей воды, истекающей через короткий цилиндрический канал в атмосферу, при различных перегревах ΔT в потоке и различных механизмах вскипания (на готовых центрах (a), при интенсивном гетерогенном парообразовании (b), при гомогенном зародышеобразовании (c)).

$\Delta T = 65$ (a), 110 (b), 200 (c) К.

характерно для данного диапазона перегревов. На фотографиях в большинстве случаев видна неровная возмущенная поверхность струи и просматриваются отдельные пузыри, растущие в потоке. На некоторых снимках видны отдельно летящие участки струи и капли жидкости, образующиеся при ее разрыве из-за роста и разрушения крупных пузырей (рис. 3, a). С ростом перегрева выше 80 К реализуются эффективные частоты зародышеобразования $J \geq 10^8 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$ [16]. Это приводит к тому, что струя приобретает характерный конусообразный вид и с повышением температуры жидкости в струе монотонно растет угол раскрытия конуса струи (рис. 3, b). Увеличение угла раскрытия происходит до температуры $T_{0s} = 490$ К, а затем медленно начинает снижаться. Было отмечено, что струя имеет форму полого конуса.

Наблюдения и фотографии показывают, что интенсивное гетерогенное вскипание имеет место за выходным срезом канала. При температуре $T_{0s} = 650$ К интенсивность вскипания становится еще более высокой — по-видимому, начинает проявляться действие гомогенного зародышеобразования, и сечение вскипания смещается внутрь канала. В результате струя приобретает форму, близкую к параболической (рис. 3, c).

Щелевой канал. На рис. 4 представлены фотографии струй вскипающей воды при истечении с линии насыщения через короткий щелевой канал. Фотографии соответствуют различным механизмам вскипания в струе перегретой воды. Опыты показали, что расширение струи идет значительно быстрее в направлении меньшей стороны щелевого канала, чем в направлении большей. С большей стороны

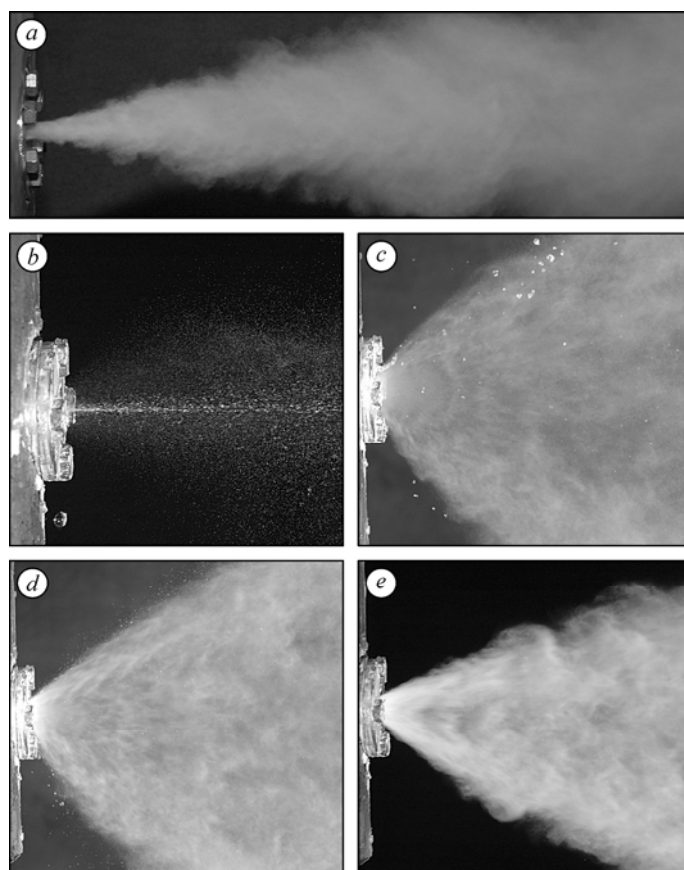


Рис. 4. Формы струй вскипающей воды, истекающей через короткий щелевой канал в атмосферу, при различных перегревах ΔT в потоке и различных механизмах вскипания (на готовых центрах (b, c), при интенсивном гетерогенном парообразовании (d), при гомогенном зародышеобразовании (a, e)).

$\Delta T = 200$ (a), 15 (b), 65 (c), 110 (d), 200 (e) К.

щели с ростом начальной температуры жидкости угол расширения практически не изменялся и был равен $\sim 20^\circ$ (рис. 4, a), в то время как с меньшей стороны изменение угла раскрытия конуса струи с ростом в рабочей камере носит немонотонный характер: до температуры 570 К происходит постепенное увеличение угла от 60° до 120° , а затем его снижение до тех же 60° . Поперечное сечение струи на расстоянии 1 м от выходного сечения канала тоже имеет форму прямоугольника. При этом, например, для горизонтальной щели большая сторона прямоугольного сечения располагается вертикально и увеличивается почти в 50 раз, а меньшая сторона струи на этом расстоянии увеличивается примерно в 5000 раз. Таким образом, режим истечения кипящей жидкости отличается от истечения газа: известно, что газовая струя при истечении через щелевой канал на некотором удалении от выходного среза становится цилиндрической.

На рис. 4, b–e показаны струи, истекающие через горизонтальный щелевой канал (вид сбоку) при различных механизмах распыла струи. Для температуры 390 К струя уже распыляется на мелкие капли (рис. 4, b). Распыление струи обусловлено как гидравлическим диспергированием через узкую щель, так и слабоинтенсивными фазовыми превращениями. С дальнейшим повышением температуры до 520 К на снимках просматривается центральный жидкостный след и расширяющееся паровое облако. На рис. 4, c показана струя при 530 К — виден не только большой угол распыла конуса струи, но также крупные капли на границах струи. Пара-

метры струи (температура и давление) на выходе из канала соответствовали вскипанию на отдельных центрах при частотах зародышеобразования $J \sim 10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$. При интенсивном гетерогенном парообразовании капли на границах становятся значительно мельче, а струя структурируется: парожидкостная среда распределена неравномерно по сечению струи — значительная ее часть (до 90 %) сосредоточена по периферии прямоугольника (рис. 4, *d*). Последняя форма струи (рис. 4, *e*) соответствует гомогенному зародышеобразованию в потоке, и угол раскрытия значительно уменьшается (до 60°). При таком чрезвычайно сильном и сосредоточенном парообразовании вскипание происходит уже внутри канала, в то время как при предшествующих механизмах вскипание происходило за выходом из канала. В этом случае канал начинает оказывать влияние на форму струи и она приобретает более схлопнутый вид.

Пульсации в потоке перегретой воды

Вскипание струи перегретой воды, истекающей через короткие каналы, сопровождалось сильными пульсациями параметров потока. В частности, заметно флуктуировали угол раскрытия струи, локальная плотность двухфазной среды и длина жидкого ядра струи от выходного среза канала до сечения интенсивного вскипания. Масштаб пульсаций значительно возрастал в случае переходных режимов вскипания. В работе были определены спектральные характеристики таких пульсаций.

Измерения интенсивности пульсаций производили методом фотометрии лазерного излучения, прошедшего через струю в поперечном направлении. Лазерный луч толщиной 1 мм имел линейную развертку в 70 мм и проходил через струю на расстоянии 20 мм за выходным срезом канала. Колебания интенсивности лазерного луча фиксировались с помощью фотодиода. По полученным временным рядам данных методом Фурье-преобразования определялись спектры мощности пульсаций и функции амплитудного распределения флуктуаций.

При истечении через цилиндрические каналы пульсации струи сильно возрастали при переходе к режиму с полным развалом струи. Спектры мощности, соответствующие переходу к полному раскрытию струи, имели $1/f$ вид [13, 14]. Как было отмечено выше, при истечении через щелевой канал полного раскрытия струи не наблюдалось. Однако в этом случае заметное возрастание амплитуд пульсаций наблюдалось при смене механизмов парообразования в потоке. На рис. 5 приведена экспериментальная реализация, а на рис. 6 представлена плотность распределения пульсаций в переходном режиме от вскипания на отдельных

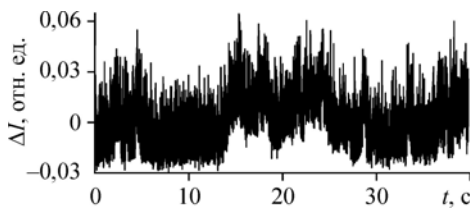


Рис. 5. Экспериментальная реализация пульсаций интенсивности лазерного луча, прошедшего через вскипающую струю. $\Delta T = 70 \text{ К}$.

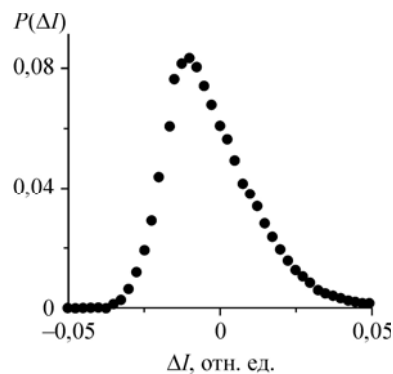


Рис. 6. Плотность вероятности распределения пульсаций для реализации, приведенной на рис. 5.

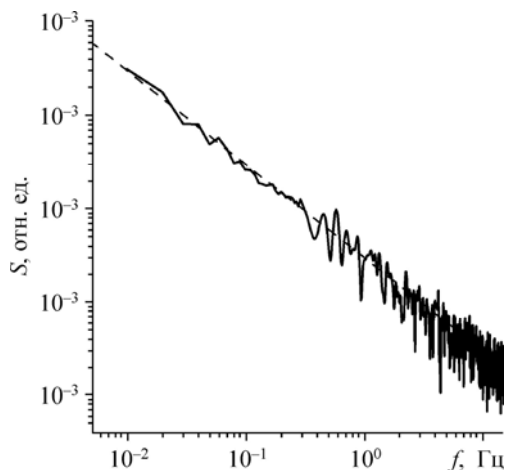


Рис. 7. Спектр мощности пульсаций.
 $\Delta T = 70$ К.

невзаимодействующих центрах кипения к интенсивному парообразованию на многочисленных гетерогенных центрах.

На рис. 7 приведен спектр мощности таких пульсаций. Видно, что в области низких частот спектр мощности имеет $1/f$ вид. Плотность распределения, приведенная на рис. 6, в области малых значений флуктуаций близка к гауссовской, но начинает отличаться от нормального распределения в области больших

значений, что соответствует низкочастотной расходящейся части спектра мощности и означает возможность больших низкочастотных выбросов в потоке.

Переходный режим от вскипания на отдельных невзаимодействующих центрах кипения к интенсивному парообразованию на многочисленных гетерогенных центрах наблюдался в узком температурном интервале 440–445 К. Подобная картина наблюдалась и при переходе от интенсивного гетерогенного парообразования к гомогенному флуктуационному вскипанию в интервале 555–560 К. При других температурах спектр мощности флуктуаций в области низких частот не зависел от частоты, т. е. имел вид спектра белого шума. Опыты проводились как с вертикальным расположением щелевого канала, так и с горизонтальным. Спектры мощности флуктуаций для обоих случаев совпадали.

Следует отметить, что переходные режимы, соответствующие различным механизмам парообразования, наблюдались в опытах по истечению воды как через щелевой, так и через цилиндрический канал. Во всех этих случаях в спектрах мощности наблюдалась $1/f$ составляющая. Переходный режим кипения от единичных центров к интенсивному гетерогенному кипению для щелевого канала наблюдался при меньших температурах (на 10 К), чем у цилиндрического канала. Это связано с более высокой шероховатостью щелевых каналов. В наших опытах использовался щелевой канал, который был изготовлен электроискровым методом и имел более неровную поверхность, чем цилиндрический канал. Данные неровности облегчали вскипание на гетерогенных центрах, что приводило к снижению температуры, относящейся к скачкообразному росту частоты зародышеобразования. Однако переход от интенсивного гетерогенного парообразования к гомогенному флуктуационному вскипанию для обоих каналов происходил при тех же самых температурах.

Заключение

Проведенные эксперименты свидетельствуют, что форма струи горячей воды, истекающей из камеры высокого давления через короткие каналы различной формы, в существенной степени определяется механизмами парообразования в перегретой жидкости. При истечении перегретой воды из камеры высокого давления через цилиндрические каналы при наличии плоскости за выходным срезом и в условиях взрывного вскипания наблюдается полное раскрытие струи, тогда как при истечении через щелевой канал полного раскрытия не наблюдалось. В переходных режимах вскипания — при переходе к полному раскрытию струи, а также

при смене механизмов парообразования в перегретой жидкости — наблюдается возрастание амплитуд пульсаций параметров потока, и в спектрах мощности пульсаций появляется составляющая, обратно пропорциональная частоте ($1/f$ шум).

Возможность крупномасштабных низкочастотных пульсаций в переходных режимах вскипания потоков перегретой жидкости следует учитывать при анализе последствий внезапной разгерметизации сосудов и трубопроводов высокого давления с горячим теплоносителем.

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука. 1972. 312 с.
2. Lienhard J.H., Day J. B. The breakup of superheated liquid jets // Trans. ASME D: J. Basic Engng. 1970. No. 92. P. 515–519.
3. Шуравенко Н.А., Исаев О.А., Скрипов В.П. Взрывное вскипание перегретой жидкости при течении через короткие насадки // ТВТ. 1975. Т. 15, № 4. С. 896–398.
4. Хлесткин Д.А. Определение расходов метастабильной жидкости // Теплоэнергетика. 1978. № 1. С. 78–80.
5. Wildgen A., Straub J. The boiling mechanism in superheated free jets // Int. J. Multiphase Flow. 1989. Vol. 15, No. 2. P. 193–207.
6. Kurschat Th., Chaves H., Meier G.E.A. Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets // J. Fluid Mech. 1992. Vol. 236. P. 43–59.
7. Simous–Moreira J.R., Vieira M.M., Angelo E. Highly expanded flashing liquid jets // J. Thermophysics Heat Transfer. 2002. Vol. 16, No. 3. P. 415–424.
8. Polanco G., Hold A.E., Munday G. General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. No. 173. P. 2–18.
9. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Бусов К.А., Коверда В.П., Роечко В.В. Кризисные явления в струе вскипающих водных растворов // Тр. 5-й Росс. нац. конф. по теплообмену (РНКТ-5), Москва, 25–29 октября, 2010. Т. 4. С. 153–156.
10. Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Skripov V.P., Mazheiko N.A., Vinogradov A.V. $1/f$ noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46, No. 10. P. 1879–1883.
11. Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П. $1/f$ -шум при неравновесном фазовом переходе. Эксперимент и математическая модель // ЖЭТФ. 1998. Т. 113, вып. 5. С. 1748–1757.
12. Решетников А.В., Скрипов В.П., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. $1/f$ — флуктуации в кризисных режимах течения перегретой жидкости // ТВТ. 2002. Т. 40, № 3. С. 481–484.
13. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Беглецов В.Н., Коверда В.П. Динамика пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой воды // Письма в Журнал технической физики. 2007. Т. 33, вып. 17. С. 31–37.
14. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. Неравновесные фазовые переходы в струе сильно перегретой воды // ТВТ. 2007. Т. 45, № 6. С. 838–846.
15. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Surtaev A.S., Zhukov V.E. Peculiarities of superheated liquid discharging under strong and weak nonequilibrium conditions // J. Engng. Thermophys. 2010. Vol. 19, No. 4. P. 289–305.
16. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 244 с.
17. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 125–132.

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2011 г.