

УДК 536.423

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМОВ ИСТЕЧЕНИЯ И ВЗРЫВНОЕ ВСКИПАНИЕ СТРУЙ ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ

**А. В. Решетников, Н. А. Мажейко, А. В. Виноградов, В. Н. Беглецов,
В. Н. Скоков, В. П. Коверда**

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

При аварийных ситуациях с образованием течи в паропроводе или сосуде высокого давления могут реализовываться условия взрывного парообразования на центрах флуктуационной природы в потоке теплоносителя. Исследование особенностей поведения интегральных и флуктуационных характеристик потока (расход, реактивная отдача струи, её форма, колебательные процессы в струе и др.) связано как с фундаментальной проблемой нахождения закономерностей и характеристик взрывного вскипания теплоносителей при глубоких заходах в область метастабильных фазовых состояний, так и с практическими задачами обеспечения безопасности эксплуатации энергетических установок.

При начальных параметрах жидкости близких к термодинамической критической точке перегревы могут достигать предельных значений и в потоке реализуются условия интенсивного гомогенного парообразования [1]. Предельные перегревы жидкости в потоке при квазистатической оценке соответствует спиноподобному состоянию жидкости, а при кинетической оценке – достаточно высоким значениям скорости появления жизнеспособных пузырьков пара. Одним из способов достижения предельных перегревов жидкости в опытах является организация истечения горячей жидкости через короткий цилиндрический канал, у которого отношение длины канала к диаметру порядка единицы – термодинамически сильно неравновесный режим истечения.

Изучение струй однокомпонентных вскипающих жидкостей (вода, фреон, пентан) в термодинамически сильно неравновесном режиме истечения в широкой области начальных состояний, включая окрестность термодинамической критической точки, выявило ряд особенностей. Одна из особенностей состояла в кризисном поведении реактивной отдачи и формы двухфазной струи – полный развал струи [2]. На рис.1. приведена зависимость приведенного значения реактивной силы струи воды от начальной температуры в камере при истечении с линии насыщения. Приведение результатов проводилось с использованием масштаба, рассчитанного в рамках гидравлического приближения (пунктирная линия на рис.1). Из рис.1 видно, что в интервале температур (480 – 580)К, соответствующему полному раскрытию струи, реактивная сила принимает близкие к нулю значения.

Следует заметить, что подобное поведение реактивной отдачи струи наблюдались только при определенных внешних геометрических условиях. Геометрические условия на выходе из канала для однокомпонентных жидкостей моделировали случаи разгерметизации при поперечном разрыве трубопровода и течь из боковой стенки. Было установлено, что для случая, соответствующего поперечному разрыву трубопровода, реактивная отдача струи перегретой воды изменяется монотонно с ростом давления и температуры в камере. При экспериментальном моделировании истечения из боковой стенки было найдено, что поведение реактивной силы струи с ростом температуры, как вдоль линии насыщения, так и по изобарам, может носить немонотонный характер (см. рис. 1). Резкое снижение реакции струи связывается с её полным развалом, обусловленным как взрывным вскипанием в струе перегретой жидкости, так и наличием плоскости перпендикулярной оси струи за выходным срезом канала [2, 3].

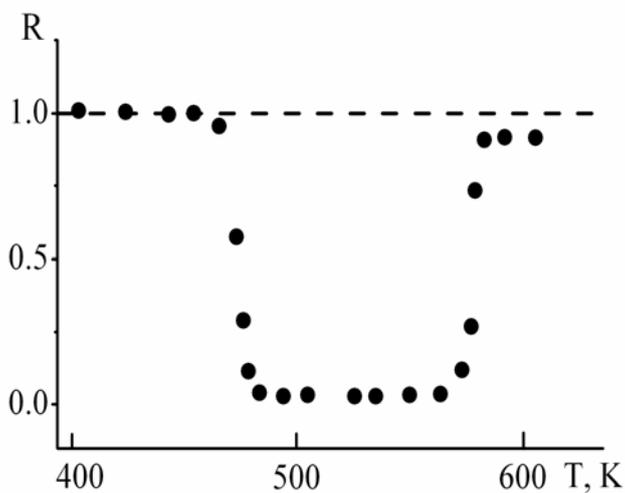


Рис.1. Приведенные значения реактивной силы в зависимости от начальной температуры воды. Пунктирная линия – расчет в гидравлическом приближении.

Другая особенность в поведении двухфазных струй проявлялась в крупномасштабных низкочастотных флуктуациях ($1/f$ или фликкерные флуктуации), размах которых сопоставим со средними значениями параметров, характеризующих истекающую среду [3, 4]. Циклу исследований флуктуационных процессов с фликкерным спектром в теплофизических системах положили начало опыты по изучению термических флуктуаций при кипении азота в кризисном режиме на высокотемпературном сверхпроводнике. На основании этих опытов была предложена модель, согласно которой генерация фликкер-шума в системе может являться результатом взаимодействия неравновесных фазовых переходов в присутствии белого шума [5]. Экстремальный характер кризисных процессов на практике может приводить к неблагоприятному развитию ситуации. Актуальным является воздействие на истекающую среду с целью устранения или сведения к минимуму отрицательных последствий кризисных явлений. Эксперименты показывают, что поведение интегральных и локальных характеристик струи сильно перегретых жидкостей существенно определяется кинетикой рождения пузырьков пара в условиях высоких пересыщений [6]. Поэтому, воздействуя на кинетику зарождения пара, можно влиять на интегральные характеристики потока и флуктуационные процессы в нем. Эффективным способом воздействия на кинетику является введение в рабочую жидкость различных добавок, в частности, легкокипящих примесей [7]. В докладе

приводятся результаты экспериментального исследования динамики вскипания струй двухкомпонентных перегретых жидкостей (раствор этанол-вода) для термодинамически сильно неравновесного режима истечения при изменении геометрических условий на выходе из канала.

Наблюдению и фотографированию вскипания в струях раствора этанол-вода предшествовало изучение форм струй чистого вскипающего этанола при истечении в широкой области начальных состояний, включая окрестность термодинамической критической точки. Истечение горячего этанола осуществлялось из камеры высокого давления, обеспечивающей стационарное истечение через канал в атмосферу в течение нескольких десятков секунд. В опытах с неравновесным режимом истечения использовался короткий цилиндрический канал с отношением длины к диаметру $l/d=1.4$ при диаметре $d=0.5$ мм. Температура кипения этанола составляет $T_b=351.5$ К и параметры термодинамической критической точки – давление $p_c=6.4$ МПа, температура $T_c=516.3$ К. Все указанные параметры заметно отличаются от соответствующих параметров воды в меньшую сторону. Начальные параметры жидкости в рабочей камере (давление p_{0s} , температура T_{0s}) соответствовали линии насыщения.

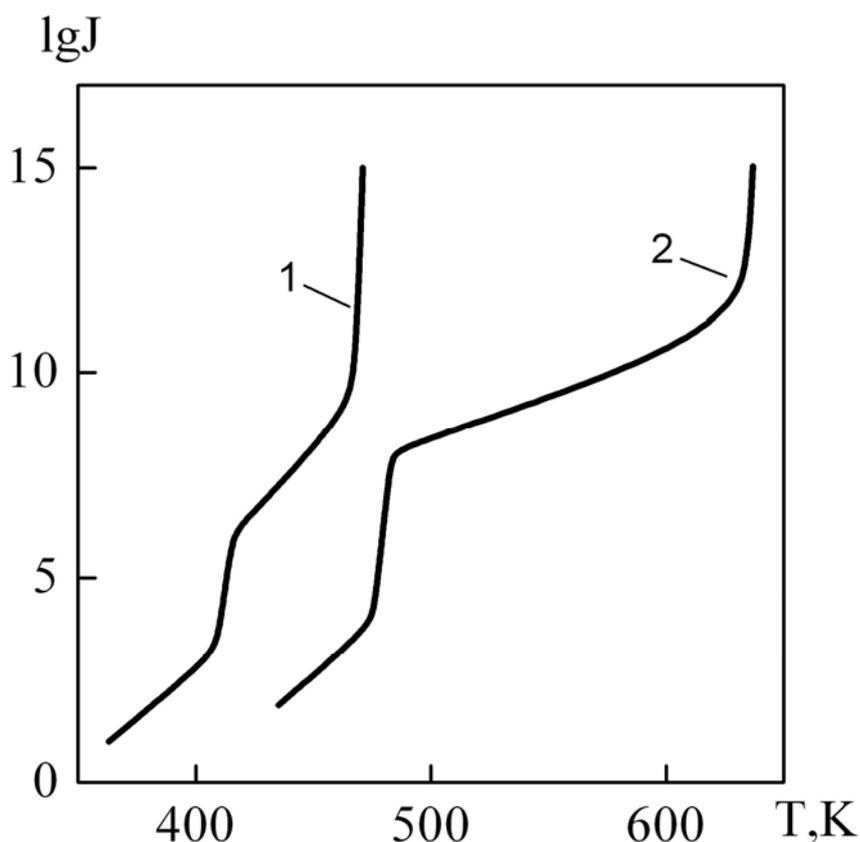


Рис. 2. Зависимость частоты зародышеобразования пузырьков пара этанола и воды J , $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$ от температуры при атмосферном давлении; 1 – кинетическая кривая зародышеобразования для этанола; 2 – кинетическая кривая зародышеобразования для воды. Сплошными линиями показаны аппроксимации экспериментальных данных из [9].

Кинетика рождения пузырьков пара в перегретой жидкости характеризуется частотой зародышеобразования, которая равна числу жизнеспособных пузырьков, образующихся в единице объема перегретой жидкости за единицу времени. Температурные зависимости частот зародышеобразования для воды и спирта при атмосферном давлении показаны на рис. 2. В опытах по истечению этанола получена серия фотографий при различных начальных температурах на линии насыщения. Выделено несколько видов форм струи, соответствующие различным степеням перегрева и механизмам парообразования. Так, при начальной температуре на линии насыщения $T_{0s} < 400\text{K}$ струя этанола имеет цилиндрический вид и похожа на струю холодной, не вскипающей жидкости. При перегревах $\Delta T = T_{0s} - T_s(p_a) < 50\text{K}$ (p_a – атмосферное давление) и частотах образования пузырьков пара на гетерогенных (легко активируемых) центрах кипения $J < 10^3 \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$ (кривая 1 на рис.2) на фотографиях струй не обнаруживаются даже отдельные пузыри на расстояниях нескольких десятков сантиметров. С ростом перегрева выше 50K число объемных гетерогенных центров кипения в этаноле резко возрастает, и реализуются эффективные частоты зародышеобразования $J \geq 10^6 \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$. Струя принимает коническую форму и с повышением температуры угол распыла монотонно растет. На температурном интервале от $T_{0s} = 460\text{K}$ до $T_{0s} = 490\text{K}$ зафиксирован полный развал струи – угол раскрытия конуса струи $\alpha = 180^\circ$. Полный развал струи обусловлен гомогенным зародышеобразованием, наблюдающимся при этих температурах, и геометрией за выходным срезом канала. В данном случае геометрические условия моделировали течь через боковую стенку трубы или сосуда высокого давления. Этим условиям соответствует наличие твердой стенки за выходом из канала, перпендикулярной оси струи. При углах раскрытия конуса струи $\alpha \geq 120^\circ$ струя захватывалась стенкой и растекалась вдоль нее, что соответствует известному в аэродинамике эффекту Коанда [8]. При более высоких температурах жидкого этанола струя по форме была близка к газовой. Последовательность форм струи горячего этанола полностью повторяла аналогичную последовательность для н-пентана и фреона. Более того, температурные интервалы подобных форм струи в приведенных значениях T_{0s}/T_C для всех упомянутых жидкостей практически совпадали. В частности, полный развал струи для этих жидкостей наблюдался при температурах $T_{0s}/T_C \geq 0.9$ и был обусловлен как интенсивным парообразованием на центрах гомогенной природы, так и наличием нормальной стенки за выходом из канала.

Похожая последовательность форм вскипающих струй упомянутых органических жидкостей и связанные с этими формами определенные механизмы парообразования свидетельствуют о термодинамическом подобии в поведении форм струй горячих жидкостей, истекающих через короткий канал.

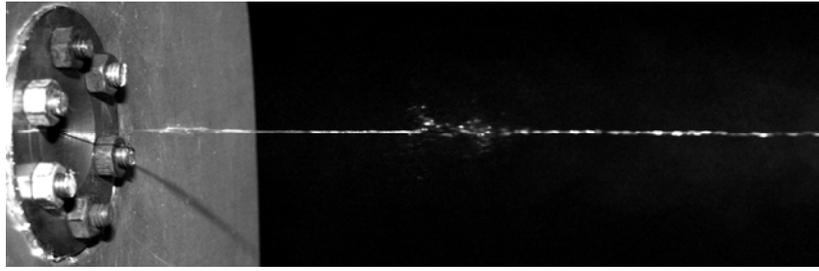
В опытах по изучению эволюции форм струи воды с ростом перегрева было выявлено своеобразие воды по отношению к органическим жидкостям [2]. Оно проявилось в том, что полный развал струи воды наблюдался уже при $T/T_C \approx 0.75$, что связано с особенностями кинетики вскипания воды. Известно, что для воды при $T/T_C < 0.9$ характерны аномально высокие частоты зародышеобразования [9] по сравнению с большинством органических жидкостей. Рис.2 позволяет провести сравнение частот зародышеобразования J , $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$ воды (кривая 2) и этанола (кривая 1) от температуры при атмосферном давлении. Следует отметить ступенчатый характер зависимостей частот зародышеобразования от температуры. В обсуждаемых далее опытах по

истечению растворов этанол-вода будут наблюдаться результаты взаимодействия кинетических процессов зародышеобразования этанола и воды в условиях высоких перегревов.

Нами проведено изучение форм струи перегретого раствора этанол-вода с ростом температуры для различных концентраций. Концентрация этанола в растворе изменялась ступенчатым образом в интервале от 0 до 100%. На рис. 3 показаны фотографии струй раствора с 50% (объемных) этанола в нем. На рис. 3а представлена струя для начальной температуры, соответствующей границе между цилиндрической и конической формами струи. При этих температурах в потоке можно обнаружить действие, как отдельных центров объемного вскипания, так и интенсивного испарения с поверхности с проявлением барокапиллярной неустойчивости [9]. На фотографиях видна неровная возмущенная поверхность и просматриваются отдельные пузыри, растущие в потоке. Выделяются отдельно летящие участки струи и капли жидкости, образующиеся при ее разрыве из-за роста и разрыва пузырей. Спектр наблюдаемых картин разрушения струи для данных перегревов многообразен. Рис. 3б дает изображение струи с большим углом раскрытия конуса струи ($\alpha \approx 110^\circ$) при реализации в ней интенсивного объемного вскипания. Для такой струи характерны не только значительные флуктуации в струе, но и взаимодействие конуса струи с поверхностью рабочей камеры. Это взаимодействие проявляется в кратковременных "залипаниях" части струи на стенку сосуда. Следующая фотография (рис. 3с) показывает полный развал струи исследуемого раствора. По сравнению с чистым этанолом нижняя температура полного развала струи раствора возросла на 5К, а по сравнению с водой понизилась на 15К. Температурный интервал полного развала составлял 60К, что в два раза больше, чем у чистого этанола, но меньше чем у воды.

Раскрытие струи сопровождалось сильными флуктуациями. Динамика таких флуктуаций исследовалась методом лазерной фотометрии. Использовался линейный распределенный источник лазерного излучения. Лазерный луч пропусклся через струю в направлении, перпендикулярном ее распространению, на расстоянии около 1см от выходного сечения сопла. Ширина зондируемой области составляла 5см. После прохождения через струю лазерное излучение фокусировалось на приемнике, и его интенсивность измерялась с помощью фотодиода и измерительной схемы.

Интенсивность прошедшего через струю луча сильно флуктуировала. На рис. 4а приведена реализация флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через струю 50% раствора этанол – вода при начальной температуре 464К. На рис. 4б в полулогарифмических координатах приведена функция распределения флуктуаций. Из рис. 4б видно, что функция распределения флуктуаций имеет вид, близкий к экспоненциальному. По измеренным реализациям определялись спектры мощности флуктуаций. Спектр мощности, соответствующий реализации, приведенной на рис.4, показан на рис.5 (в двойных логарифмических координатах). Из рис.5 видно, что спектр мощности флуктуаций изменяется в области низких частот обратно пропорционально частоте на протяжении более трех десятичных порядков (пунктирная линия – зависимость, обратно пропорциональная частоте). Следует отметить, что усреднение реализаций по некоторому масштабу времени ("огрубление" реализаций) [10] не изменяет частотную зависимость спектров мощности и, начиная с некоторого масштаба, вид функций распределения, т.е. флуктуации проявляют масштабно-инвариантные свойства.



a



b



c

Рис. 3. Формы струй вскипающего раствора этанол-вода (50%), истекающего через короткий канал в атмосферу, при различных начальных температурах: а) $T = 413\text{K}$; б) $T = 453\text{K}$; в) $T = 513\text{K}$

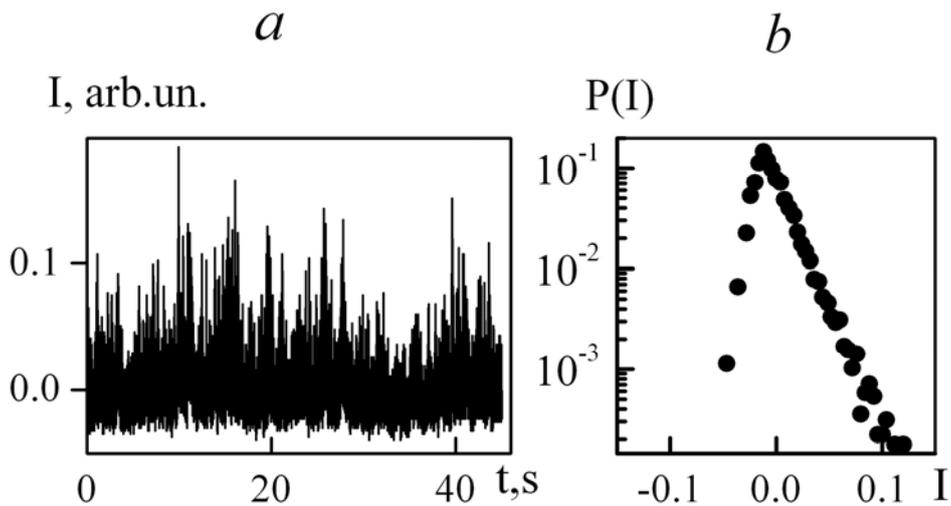


Рис. 4. Реализация флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через струю 50% раствора этанол – вода при начальной температуре 464K – а и соответствующая функция распределения (в полулогарифмических координатах) – б.

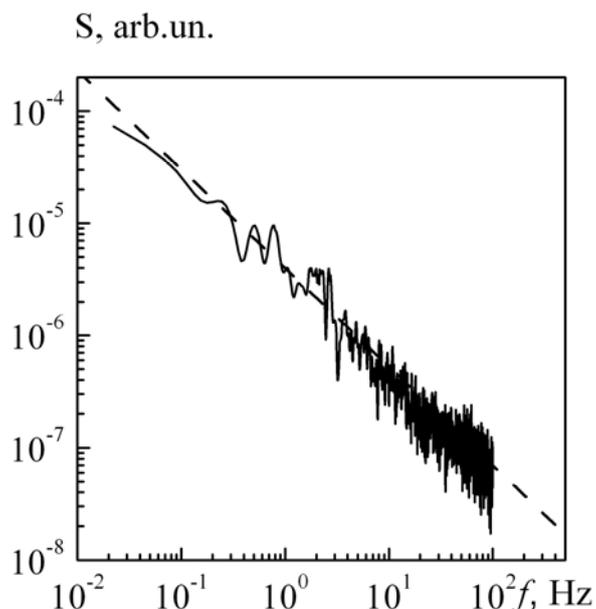


Рис.5. Спектр мощности флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через струю 50% раствора этанол – вода при начальной температуре 464К. Пунктирная линия – зависимость $\sim 1/f$.

Таким образом, взрывное вскипание в термодинамически неравновесных потоках водных растворов приводит к интенсивным пульсациям с низкочастотной расходимостью спектров мощности по закону $1/f$, что свидетельствует о неустойчивости потока и возможности крупномасштабных низкочастотных выбросов.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование влияние низкокипящей компоненты в растворе воды на эволюцию форм струи в условиях высоких и предельных перегревов жидкости. Отмечена такая же последовательность видов струи раствора с увеличением перегрева, как и у чистых жидкостей. Вместе с тем установлено, что низкокипящая жидкость приводит к смещению границ между различными видами вскипающих струй – цилиндрической, конической и веерной (развалившейся) в сторону более низких температур. Исследования динамики вскипания струй раствора этанол-вода показали наличие $1/f$ флуктуаций при переходе к полному развалу струи.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-08-01321-а и 07-01-96080-р_урал_а).

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
2. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. Струи вскипающих жидкостей. ПМТФ. 2000. Т.41, №3. С. 125-132
3. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Беглецов В.Н., Скоков В.Н., Коверда В.П. Динамика пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой воды. Письма в

ЖТФ. 2007. Т.33, вып.17. С.31-36.

4. Skokov V.N., Koverda A.V., Reshetnikov A.V., et al., 1/f noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer. Int. J. Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. p. 1879-1883.
5. 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.
6. Решетников А. В., Скрипов В. П., Коверда В. П., Скоков В.Н. Термодинамический кризис во вскипающих потоках. Обнаружение фликкер-шума. Известия Академии Наук. Энергетика. 2003, №1. С. 118-125.
7. Виноградов В.Е., Кусков Г. В., Сеницын Е. Н. Распад газонасыщенной воды. Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32. С.72-78.
8. Ляховский Д. Н. Кинематический ультрадиффузор и перспективы его применения в топочной технике. Теплопередача и аэрогидродинамика. Л.: Машгиз, 1955. С. 3-128.
9. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. –244с.
10. Коверда В.П., Скоков В.Н., Масштабные преобразования 1/f флуктуаций при неравновесных фазовых переходах. Журнал технической физики. 2004. Т .74. С. 4-8.