

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

Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУЕ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ

АННОТАЦИЯ

Рассматривается экспериментально обнаруженное кризисное поведение интегральных характеристик струи перегретой воды – расхода, формы и реактивной отдачи струи. Обсуждение ведется с использованием данных по кинетике нуклеации воды и с привлечением модели взрывного вскипания. Показано, что взрывное вскипание ответственно за кризисное поведение расхода, а интенсивное объемное вскипание воды на центрах гетерогенной природы – за кризис реактивной отдачи и формы струи. Экспериментально установлено, что в кризисных режимах течения перегретой воды существуют интенсивные флуктуации, спектр мощности которых изменяется обратно пропорционально частоте (фликкер или $1/f$ – шум).

1. ВВЕДЕНИЕ

Кризисные явления обычно характеризуются резким или скачкообразным изменением параметров. Такое поведение может приводить к неблагоприятным ситуациям на практике. Например, в случае кризиса теплообмена при фиксированном тепловом потоке происходит резкое повышение температуры теплоотдающей поверхности и возможен ее пережог. Экстремальный характер кризисных режимов привлекает внимание исследователей как для изучения причин и последствий кризисного поведения, так и особенностей его протекания. Хотя в этом направлении исследований достигнуты определенные успехи [1], но до сих пор обнаруживаются новые закономерности кризисного поведения. Было отмечено, что кризисные режимы сопровождаются интенсивными флуктуационными процессами. Изучение спектральных характеристик этих флуктуационных процессов показало, что спектр мощности флуктуаций может изменяться обратно пропорционально частоте в области низких частот (фликкер или $1/f$ – шум)[2]. Наличие $1/f$ – флуктуаций в системе указывает на возможность крупномасштабных выбросов. В работе [2] была предложена модель, согласно которой генерация фликкер-шума в системе может возникать в условиях неравновесных фазовых переходов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение интегральных характеристик потока (расход, реактивная отдача струи) вскипающей воды при равновесном режиме истечения (длинные каналы) показало, что поведение параметров потока носит монотонный характер [3]. Но обнаруженное кризисное поведение расходов вскипающей воды для коротких каналов в [3] не нашло адекватного

объяснения, и результаты представлены только в графическом виде. Рациональное объяснение наблюдающихся эффектов пришло из области исследований метастабильных фазовых состояний [4]. Изучение расходов вскипающих органических жидкостей при истечении через короткий канал ($l/d \ll 1$) показало, что при температурах $T/T_C \geq 0.9$ (где T_C – температура термодинамической критической точки вещества) наблюдается резкое снижение расхода жидкости (кризис расхода) [5]. Оно обусловлено достижением жидкостью околоспинодальных фазовых состояний в результате быстрого снижения давления и реализацией в потоке интенсивного флуктуационного зародышеобразования на центрах гомогенной природы – взрывного вскипания. Аналогичный результат – кризис расхода – вскоре был получен и на воде [6]. Важным итогом изучения расходов перегретой жидкости в термодинамически неравновесном режиме истечения является обобщение экспериментальных данных с применением метода термодинамического подобия [7].

Изучение форм струй вскипающих жидкостей при истечении через короткий канал в широкой области начальных состояний выявило ряд особенностей. Обнаружен полный развал струи – кризис формы двухфазной струи [8], который при истечении n-пентана связывался с реализацией в струе условий взрывного вскипания.

Нами было проведено экспериментальное исследование форм сильно перегретой воды с ростом начальной температуры при изменении геометрических условий за выходом из канала, что ранее не изучалось [9]. Один прижимной фланец моделировал конфигурацию истечения при продольном разрыве трубы, другой – истечение при поперечном разрыве.

Первой конфигурации соответствовало наличие за выходом плоскости, перпендикулярной оси канала. При перегревах $\Delta T = T_{0s} - T_s(p_a) < 50$ К (p_a – атмосферное давление) и частотах образования пузырьков пара на гетерогенных (легко активируемых) центрах кипения $J < 10^5$ см⁻³·с⁻¹ на фотографиях струй не обнаруживаются даже отдельные пузыри на расстояниях равных нескольким десяткам диаметров струи – цилиндрическая форма струи (рис. 1а).

При перегревах в интервале 50 К $< \Delta T < 90$ К экспериментально определенные частоты зародышеобразования находятся в диапазоне 10^5 см⁻³·с⁻¹ $< J < 10^8$ см⁻³·с⁻¹ и уже заметно влияние фазовых превращений на форму струи. Механизм разруше-

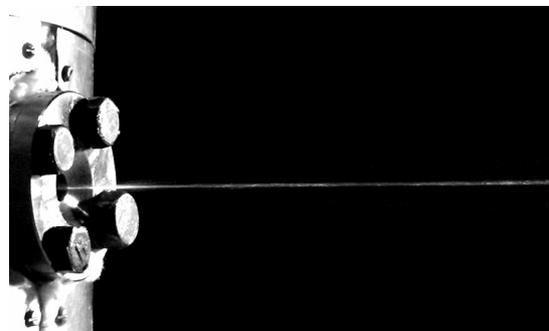
ния струи при этих перегревах преимущественно связан с барокапиллярной неустойчивостью поверхности струи, обусловленной интенсивным испарением с поверхности струи [10]. Также при этих температурах в потоке можно обнаружить действие отдельных центров объемного вскипания. Воздействие двух указанных механизмов 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. Спектр наблюдаемых неоднородностей весьма широк.

С ростом перегрева выше 90К число объемных гетерогенных центров кипения в воде достигает таких значений, что реализуются эффективные частоты зародышеобразования $J \geq 10^8 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ [10]. Это приводит к тому, что с повышением температуры жидкости в струе монотонно растет угол распыла. Увеличение угла раскрытия струи имеет место до температуры $T_{0s} = 210^\circ\text{C}$. Было отмечено, что струя имеет форму полого конуса, т. е. парожидкостная среда распределена в основном по образующим конуса (до 90% массы) и практически отсутствует вдоль его оси (рис. 1б).

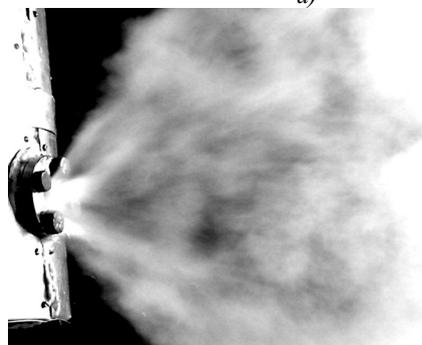
На фотографии (рис. 1в) для интервала температур от $T_{0s} = 220^\circ\text{C}$ до $T_{0s} = 300^\circ\text{C}$ зафиксирован полный развал струи. Угол раскрытия конуса струи $\alpha = 180^\circ$ определяется геометрией прижимного фланца. В опытах с н-пентаном полный развал наблюдался при температурах $T_0 \geq 0.9T_c$ [8]. В данной работе полный развал имел место при приведенных температурах T_0/T_c от 0.75 до 0.90. Он не может быть объяснен в рамках теории гомогенной нуклеации. Согласно экспериментальным данным вода проявляет на практике необычно высокую интенсивность гетерогенного зародышеобразования [10]. В отмеченном температурном интервале частоты активации гетерогенных центров $J \geq 10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ обеспечивают интенсивное объемное вскипание, которое происходит за выходным срезом канала. При этом струя приобретает форму полого конуса с углом при вершине (угол распыла) $\alpha \geq 120^\circ$. Такая форма струи становится неустойчивой при наличии стенки, перпендикулярной оси струи (роль стенки выполняет прижимной фланец), и струя примыкает к плоскости фланца в соответствии с эффектом Коанда [11]. При температуре $T_{0s} = 310^\circ\text{C}$ вступает в действие гомогенное зародышеобразование: струя уже не разваливается и приобретает форму близкую к параболической.

Для второго фланца, имитирующего отсутствие плоскости, перпендикулярной оси канала за выходом из него, также проведены опыты по истечению вскипающей воды при начальных параметрах, соответствующих линии насыщения. Струя для этой конфигурации истечения повторяла те же формы в

зависимости от перегрева, что и для первого фланца, но полный развал струи не наблюдался. В соответствующем температурном интервале у второго фланца наблюдалась конусообразная форма струи с большим углом раскрытия. Это согласуется с данными других авторов [9], использовавших в опытах с водой аналогичные геометрические условия истечения.



а)



б)



в)

Рис. 1. Формы струй вскипающей воды, истекающей через короткий канал в атмосферу, при различных перегревах ΔT в потоке: а – $\Delta T = 50 \text{ К}$; б – $\Delta T = 100 \text{ К}$; в – $\Delta T = 170 \text{ К}$

Одной из важных интегральных характеристик потока, которая может служить для построения модельных представлений, является реактивная сила струи, которая наблюдается в процессах истечения. Более того, реактивная отдача двухфазной струи представляет интерес и с практической точки зрения. Она важна, например, при определении движущей силы различного рода реактивных аппаратов и силовых воздействий струи на элементы оборудования при аварийной разгерметизации трубопроводов или сосудов высокого давления с горячими жидкостями.

Исследования динамической реакции струи органических жидкостей в неравновесном режиме истечения показали наличие резкого снижения величины силы реакции при полном развале струи – кризис реактивной силы [12].

В настоящей работе представлены результаты для перегретой воды. Измерения реактивной отдачи струи были проведены на лабораторной установке кратковременного действия, обеспечивающей стационарный режим истечения в атмосферу в течение нескольких десятков секунд. В опытах использовался короткий цилиндрический канал длиной $l = 0,7$ мм и диаметром $d = 0,5$ мм. Начальные параметры жидкостей в рабочей камере (давление p_0 , температура T_0) соответствовали линии насыщения и линиям с постоянным начальным давлением (изобары $p_0 = 6$ и 10 МПа). В опытах применялись те же прижимные фланцы, что и при наблюдении форм струи.

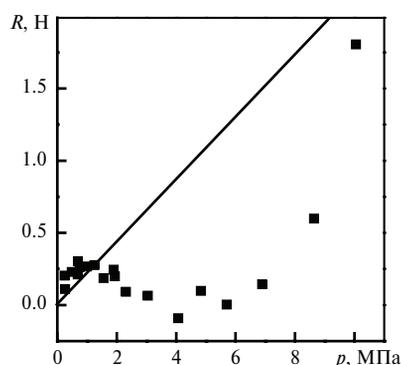


Рис. 2. Зависимость реактивной силы струи перегретой воды от начального давления, соответствующего линии насыщения

На рис. 2 приведены результаты измерений реактивной силы R струи вскипающей воды, полученные в наших опытах, для первого фланца. Точками показаны данные опытов. Сплошная линия – расчет для гидравлического режима истечения однофазной (невскипающей) жидкости. Из рисунка видно, что при малых давлениях ($T_{0s} < 210$ °С) экспериментальные результаты совпадают с гидравлическим расчетом:

$$R = 2\mu S(p_0 - p_a). \quad (1)$$

Здесь μ – гидравлический коэффициент расхода (для нашего канала $\mu = 0.60$), S – площадь сечения канала.

При температуре $T_{0s} = 210$ °С величина реактивной силы струи скачком падала практически до нуля и с дальнейшим повышением температуры сопровождалась нерегулярными изменениями реакции струи около нулевого значения. Провал в поведении реактивной тяги наблюдался вплоть до 300 °С. При $T_{0s} = 310$ °С также скачком величина тяги возрастала до величин, соответствующих гидравлическому режиму истечения. Сопоставление измерений реакции струи и наблюдений за формой позволяет связать резкое уменьшение величины

реакции струи с ее полным развалом. При полном развале струи в окрестности выходного сечения канала формируется область с пониженным давлением и возникает дополнительная сила сравнимая с величиной реактивной силы и направленная в противоположную сторону.

Измерения реакции струи перегретой воды со вторым фланцем показали, что зависимость реактивной силы от начального давления принципиально отличается от первого случая. В этом случае кризисного поведения не наблюдалось, и зависимость реактивной силы носила монотонный характер. Результаты измерений хорошо описывались гидравлическим приближением.

Во время наблюдений за струей вскипающей воды были отмечены значительные флуктуации в потоке. В частности, заметно флуктуировал угол раскрытия конуса струи и локальная плотность истекающей двухфазной среды. Наличие кризисных явлений в поведении струи сильно перегретой воды указывало на возможность фликкерных флуктуаций в струе.

Проведено экспериментальное изучение флуктуационных явлений в струе перегретой воды в целях получения их спектральных характеристик в различных режимах вскипания. Флуктуации в струе вскипающей жидкости измерялись методом фотометрии лазерного излучения, прошедшего через двухфазную струю в различных ее сечениях. Колебания интенсивности лазерного луча длиной волны $\lambda = 0,65$ мкм фиксировались с помощью фотодиода ФД256, чувствительностью $0,5$ А/Вт. Сигнал оцифровывался 16 разрядным аналого-цифровым преобразователем и записывался в память компьютера. По полученным временным реализациям методом Фурье преобразования находились спектры мощности флуктуаций. Для спицеобразной формы струи с вскипанием на отдельных немногочисленных центрах в потоке спектр мощности имел зависимость с равномерным распределением интенсивности флуктуаций по частотам (белый шум). Для конусообразной формы струи с интенсивным объемным вскипанием на гетерогенных центрах наблюдался рост низкочастотной составляющей спектра обратно пропорционально частоте (фликкер или $1/f$ – шум). Спектр для конусообразного вида струи приведен на рис.3.

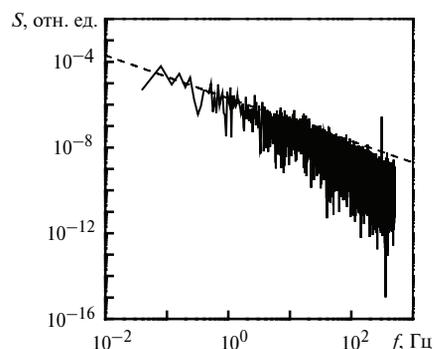


Рис. 3. Спектр мощности флуктуаций паросодержания в струе вскипающей воды при $T_{0s} = 230$ °С

Опыты показали, что при реализации в струе воды гомогенного механизма парообразования ($T_0/T_C \geq 0.9$) частотный интервал фликкер-шума расширялся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное комплексное экспериментальное исследование позволило выявить кризисные явления в струе сильно перегретой воды. Указано на связь между резким снижением расхода воды и взрывным вскипанием. Найдено, что поведение реактивной силы струи с ростом температуры может носить немонотонный характер. Резкое снижение реакции струи связывается с её полным развалом, обусловленным как интенсивным объемным флуктуационным парообразованием, так и наличием плоскости перпендикулярной оси струи за выходным срезом канала. Опыты по изучению пульсаций в струе перегретой воды показали на существование связи между генерацией фликкер-шума в струе и интенсивным объемным вскипанием, как на гетерогенных центрах, так и центрах гомогенной природы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-08-01321_a и 04-02-96092 p2004урал_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984.
2. 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.
3. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. М.: Атомиздат, 1978. 160с.
4. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
5. Шуравенко Н.А., Исаев О.А., Скрипов В.П. Взрывное вскипание перегретой жидкости при течении через короткие насадки // ТВТ. 1975. Т. 13. № 4. С. 896–898.
6. Хлесткин Д.А. Определение расходов метастабильной жидкости // Теплоэнергетика. 1978. № 1. С.78–80.
7. Решетников А.В., Исаев О.А., Скрипов В.П. Расход вскипающей жидкости при истечении в атмосферу. Переход от модельного вещества к воде // ТВТ. 1988. Т. 26. №4. С. 774–777.
8. Исаев О.А., Шуравенко Н.А. Исследование формы распыла струи с ростом перегрева жидкости на выходе из насадка// Теплофизические свойства жидкостей и взрывное вскипание. Свердловск, 1976. С. 85–97.
9. Виноградов В. Е., Кусков Г. В., Синицын Е.Н. Экспериментальное исследование истечения перегретой воды через сопла малого размера // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1990. №5. С. 43–48.
10. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 244 с.
11. Ляховский Д.Н. Кинематический ультрадиффузор и перспективы его применения в топочной технике // Теплопередача и аэрогидродинамика. Л.: Машгиз, 1955. С. 3–128.
12. Исаев О.А., Неволин М.В., Скрипов В.П., Уткин С.А. Реакция струи вскипающей жидкости // ТВТ. 1988. Т. 26. № 5. С. 1028–1030.