

03

Динамика пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой воды

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

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: reshav@itp.uran.ru

Поступило в Редакцию 30 января 2007 г.

Приведены результаты экспериментального исследования динамики пульсаций при взрывном вскипании струй перегретой воды, истекающей из сосуда высокого давления. В интервале температур 480–490 К наблюдается переход к полному развалу струи, сопровождающийся резким падением реактивной силы и интенсивными флуктуациями. Спектры мощности флуктуаций имеют расходящуюся по закону $1/f$ низкочастотную составляющую, что свидетельствует о неустойчивости потока и возможности крупномасштабных низкочастотных выбросов.

PACS: 47.55.Ca, 47.55.dp, 05.40.-a

Истечение вскипающей жидкости из сосудов высокого давления через короткое цилиндрическое сопло в атмосферу сопровождается сильным отклонением от термодинамического равновесия и глубоким заходом жидкости в область метастабильных фазовых состояний. При начальных параметрах жидкости, близких к термодинамической критической точке, перегревы могут достигать предельных значений и в потоке реализуются условия интенсивного гомогенного парообразования. Предельные перегревы жидкости в потоке при квазистатической оценке соответствуют спиноподобному состоянию жидкости, а при кинетической оценке — достаточно высоким значениям скорости появления жизнеспособных пузырьков пара $J \simeq 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ [1]. Поведение потока жидкости при неравновесном режиме истечения определяется механизмом парообразования. Так, изучение расходов вскипающих жидкостей при истечении через короткий канал (отношение длины канала к его диаметру порядка единицы) показало, что при температурах $\tau = T/T_C \geq 0.9$ (где T_C — температура термодинамической

критической точки) наблюдается резкое снижение расхода жидкости, что обусловлено реализацией в потоке интенсивного флуктуационного зародышеобразования на центрах гомогенной природы [2,3]. В этом случае гомогенное парообразование происходит внутри сопла.

При вскипании перегретой жидкости после выхода из сопла (более низкие начальные значения температуры и давления, чем при гомогенной нуклеации) обнаружена сильная корреляция механизма зародышеобразования и формы струи [4–7]. В частности, если в струе перегретой жидкости реализуется интенсивное флуктуационное зародышеобразование на гетерогенных центрах (взрывное вскипание), то может наблюдаться эффект полного раскрытия струи, когда угол раствора конуса струи составляет 180° и струя „прилипает“ к боковой поверхности камеры. Для полного раскрытия струи, помимо реализации режима взрывного вскипания жидкости, необходимо наличие за выходным срезом сопла плоскости, перпендикулярной оси сопла. Данный эффект имеет общие черты с известным эффектом Коанда в гидродинамике [8]. Полное раскрытие струи сопровождается резким уменьшением реактивной отдачи вскипающей струи и интенсивными пульсациями давления и формы струи. Величины таких пульсаций могут быть соизмеримы или даже превосходить средние значения величин. Ранее были проведены измерения локальных пульсаций давления в струях перегретого фреона при различных механизмах парообразования [6,7]. Найдено, что в условиях взрывного вскипания в спектре мощности пульсаций появляется составляющая, обратно пропорциональная частоте ($1/f$ спектры).

Низкочастотная расходимость спектров мощности свидетельствует о неустойчивости потока и означает возможность больших низкочастотных выбросов. Стационарные случайные процессы со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте, часто наблюдаются в природных явлениях [9]. Однако, несмотря на широкую распространенность, отсутствует общепринятая модель таких случайных процессов, и в различных случаях с $1/f$ спектром связываются разные причины и строятся различные модели. В работе [10] показано, что $1/f$ вид спектра мощности может быть следствием протекания и взаимодействия неравновесных фазовых переходов в системах с развитыми флуктуациями. В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования динамики пульсаций вскипающих струй перегретой воды в области взрывного вскипания.

Истечение горячей воды осуществлялось из камеры высокого давления, обеспечивающей стационарное истечение через короткий цилиндрический канал в течение нескольких десятков секунд. В опытах использовалось короткое цилиндрическое сопло длиной 0.7 mm и диаметром 0.5 mm. Начальные температура и давление воды в рабочей камере соответствовали линии насыщения. Наличие плоскости за выходным срезом сопла моделировалось использованием специальных фланцев. При начальных температурах $T \leq 480$ K струя имеет характерный конический вид, с углом распыла, зависящим от температуры. В интервале температур 480–490 K струя захватывалась внешней поверхностью рабочей камеры и растекалась вдоль ее поверхности. Струя „прилипла“ к боковой стенке, и угол раскрытия струи приближался к 180 градусам. Такое поведение струи сохранялось вплоть до 580 K. Вскипание в струе отличалось большой интенсивностью и сосредоточенностью (взрывное вскипание). На рис. 1 приведены фотографии струй вскипающей воды при начальных температурах 473 K (a) и 503 K (b). После раскрытия струи перенос парожидкостной смеси в направлении оси сопла полностью отсутствовал. С дальнейшим повышением температуры ($T \geq 580$ K), когда сечение вскипания смещается внутрь сопла, форма струи вновь становится конической.

Была измерена реактивная сила вскипающей струи. Для этого с использованием линейно распределенного лазерного источника измерилось смещение рабочей камеры из положения равновесия. После калибровки по смещению определялась реактивная сила. На рис. 2 приведена зависимость приведенного значения реактивной силы 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. 2) [11]. Из рис. 2 видно, что в интервале температур 480–580 K, соответствующем полному раскрытию струи, реактивная сила принимает близкие к нулю значения.

Раскрытие струи сопровождалось сильными флуктуациями. Для исследования динамики таких флуктуаций использовался метод лазерной фотометрии. Через парожидкостную струю пропускался лазерный луч. Интенсивность прошедшего через струю луча сильно флуктуировала. С помощью фотодиода и регистрирующей схемы происходила регистрация таких флуктуаций. По измеренным реализациям находились функции распределения и спектры мощности флуктуаций. На рис. 3 при-

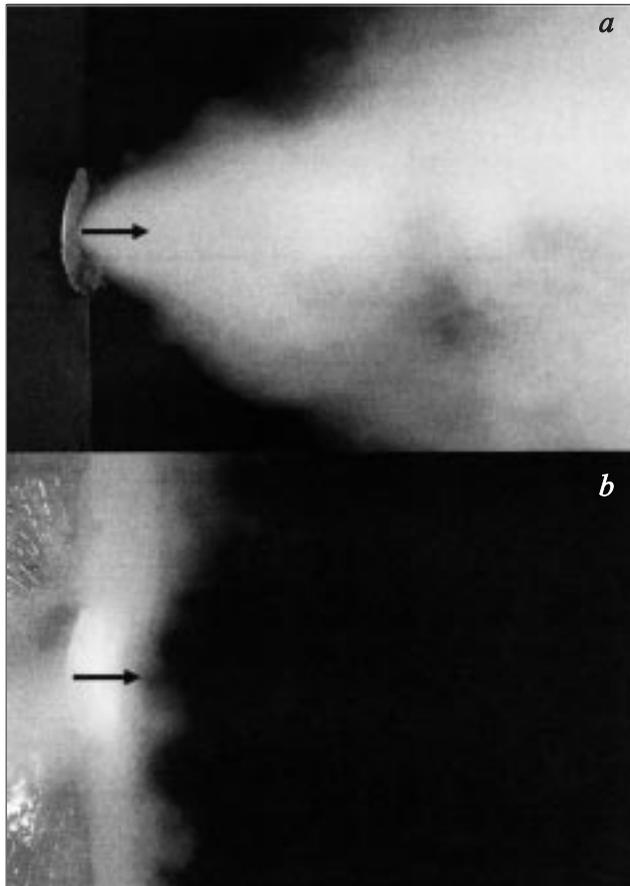


Рис. 1. Фотографии струй вскипающей воды при начальных температурах 473 К (*a*) и 503 К (*b*). Стрелками показано направление истечения из сопла.

веден спектр мощности флуктуаций при начальной температуре 493 К. На вставках приведена экспериментальная реализация и соответствующая функция распределения. Для более точного выявления характера распределения функция распределения приведена в зависимости от

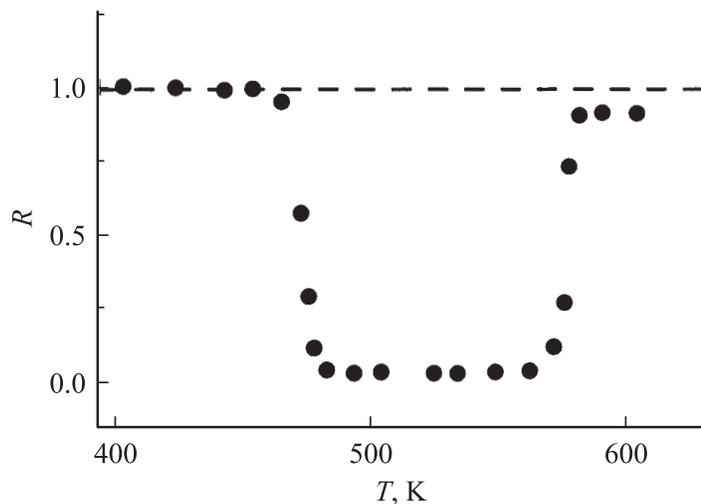


Рис. 2. Приведенные значения реактивной силы в зависимости от начальной температуры воды. Пунктирная линия — расчет в гидравлическом приближении.

квадрата аргумента и в полулогарифмических координатах. В таком представлении нормальному гауссовскому распределению соответствуют прямые линии (показаны на рисунке). Из рис. 3 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). Функция распределения в области малых значений флуктуаций близка к гауссовской, но начинает отличаться от нормального распределения в области больших значений флуктуаций, что соответствует низкочастотной расходящейся части спектра мощности и означает возможность больших низкочастотных выбросов в потоке. Следует отметить, что усреднение реализаций по некоторому масштабу времени („огрубление“ реализаций) [12] не изменяет частотной зависимости спектров мощности и, начиная с некоторого масштаба, вид функций распределения, т. е. флуктуации проявляют масштабно-инвариантные свойства.

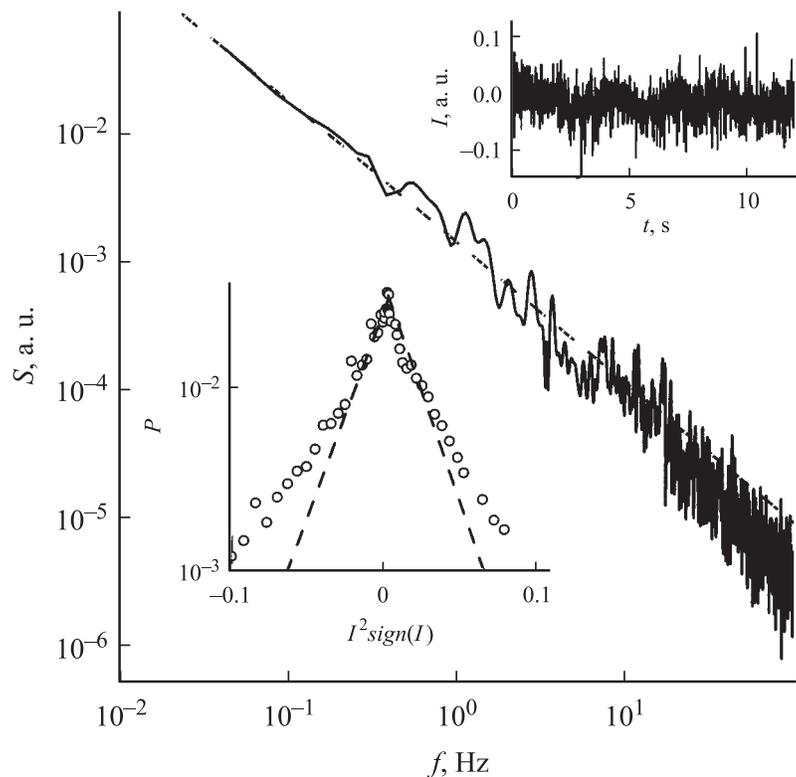


Рис. 3. Спектр мощности пульсаций при взрывном вскипании в струе перегретой воды. На вставках показана экспериментальная реализация (вверху) и функция распределения пульсаций (внизу).

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

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 05-08-01321-а.

Список литературы

- [1] Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
- [2] Шуравенко Н.А., Исаев О.А., Скрипов В.П. // ТВТ. 1975. Т. 15. № 4. С. 896–398.
- [3] Хлесткин Д.А. // Теплоэнергетика. 1978. № 1. С. 78–80.
- [4] Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П. // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3. С. 125–132.
- [5] Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. // Теплоэнергетика. 2005. В. 9. С. 56–59.
- [6] Решетников А.В., Скрипов В.П., Мажейко Н.А., Скоков В.Н., Коверда В.П. // ТВТ. 2002. Т. 40. В. 3. С. 481–484.
- [7] Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Skripov V.P., Mazheiko N.A., Vinogradov A.V. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. N 10. P. 1879–1883.
- [8] Reda J. // Sci. American. 1966. V. 214. N 6. P. 84–92.
- [9] Коган Ш.М. // УФН. 1985. Т. 145. № 2. С. 285–328.
- [10] Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113. № 5. С. 1748–1757.
- [11] Решетников А.В., Исаев О.А., Скрипов В.П. // ТВТ. 1988. Т. 26. В. 4. С. 774–777.
- [12] Коверда В.П., Скоков В.Н. // ЖТФ. 2004. Т. 79. В. 9. С. 4–8.