

ФЛУКТУАЦИИ С $1/f^\alpha$ СПЕКТРОМ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ

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

Институт теплофизики Уральского отделения РАН
620219, Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 25 марта 1999 г.

Экспериментально обнаружены $1/f$ - и $1/f^2$ -шумы при пленочном кипении воды на вертикально ориентированном платиновом нагревателе. Флуктуации с $1/f^\alpha$ -спектром наблюдались в широком диапазоне управляющих параметров и прослежены в интервале пяти десятичных порядков изменения частоты. Отмечено сходство исследованного процесса с явлением самоорганизованной критичности.

PACS: 64.60.Ht, 64.70.Fx, 72.70.+m

Стochasticеские процессы со спектром, обратно пропорциональным частоте (фликкер или $1/f$ -шум), наблюдаются в системах различной природы и довольно давно являются предметом интенсивных исследований [1–5]. Интерес к случайным процессам с расходящимися спектральными характеристиками возрос в последнее время в связи с открытием явления самоорганизованной критичности [6]. При самоорганизованной критичности система приходит к критическому поведению в процессе своей эволюции и не нуждается в тонкой подстройке управляющих параметров. Концепция самоорганизованной критичности является чрезвычайно общей и применима для описания поведения динамических систем различной природы [7], однако экспериментальные исследования проводились лишь на модельной системе "куча песка". Особенностью системы в состоянии самоорганизованной критичности является присутствие флуктуаций динамических переменных со спектральной плотностью типа $1/f$ или $1/f^2$. Флуктуации двух типов наблюдались экспериментально на модельной системе "куча песка" [6, 8] и предсказываются континуальной теорией [9].

В работах [10–12] нами приведены результаты экспериментального обнаружения тепловых пульсаций с $1/f$ -спектром при джоулевом разогреве сверхпроводника в кипящем охладителе. Отличительным моментом этих экспериментов является то, что в системе присутствовал только один источник стохастических сигналов с $1/f$ -спектром и систему можно считать сосредоточенной. Происхождение интенсивных тепловых пульсаций со спектральной плотностью обратно пропорциональной частоте, связано с взаимодействием неравновесных фазовых переходов в нелинейных подсистемах – сверхпроводник с током и кипящий охладитель. В [11, 12] предложена математическая модель пересекающихся неравновесных фазовых переходов, которая представляет систему стохастических нелинейных дифференциальных уравнений, преобразующих белый шум в две моды колебаний со спектральными плотностями, пропорциональными $1/f$ и $1/f^2$. Данная модель удовлетворительно описывает экспериментальные результаты [10–12] по обнаружению $1/f$ -шума, однако сопутствующий $1/f^2$ -спектр, предсказываемый теорией, экспериментально обнаружен не был.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального изучения флуктуаций при неравновесных фазовых переходах, в результате которого удалось обнаружить стохастические колебания со спектральными плотностями $1/f$ и $1/f^2$.

В качестве объекта исследования было выбрано пленочное кипение на проволочном нагревателе при джоулевом разогреве. Переход от пузырькового кипения к пленочному (кризис кипения) является типичным неравновесным фазовым переходом первого рода. Динамика перехода к кризису кипения существенным образом зависит от пространственной ориентации нагревателя. Так, при горизонтально расположенному нагревателю переход от пузырькового кипения к пленочному происходит в виде автоволнового распространения паровой пленки вдоль нагревателя [13, 14]. При вертикально ориентированном нагревателе возникает доменная неустойчивость, что при определенных условиях приводит к появлению бегущих доменных структур [13, 14]. Зависимость наблюданной картины от пространственной ориентации связана с существованием для вертикального нагревателя дополнительного продольного градиента температуры, вызванного конвективным отводом пара вдоль нагревателя.

Эксперименты проводили с дистиллированной водой, в которую был погружен платиновый проволочный нагреватель диаметром 100 мкм и длиной около 2 см. Измерения проводили при фиксированном напряжении источника. В экспериментах регистрировались колебания транспортного тока в цепи, связанные с кипением. По измеренным реализациям методом фурье-преобразования определялись спектральные плотности.

При возникновении пленочного кипения на горизонтально расположенном нагревателе паровая пленка распространялась на длину около 1.5 см. Поскольку, в отличие от экспериментов со сверхпроводящими нагревателями [10–12], зона тепловыделения не локализована, прямой и обратный переходы от пузырькового к пленочному кипению происходили при различных нагрузках, так как внешнего возмущения, связанного с нерегулярностью отвода пара, недостаточно, чтобы обеспечить обратимый переход между двумя режимами кипения. Спектральные плотности колебаний как пузырькового, так и пленочного кипения на горизонтальном нагревателе имели лоренцовский вид с характерной горизонтальной полкой в области низких частот.

Иная картина наблюдалась при вертикальном расположении нагревателя. Возникнув на слабом месте проволочки, очаг пленочного кипения быстро распространялся вверх на расстояние 1–1.5 см. Переход к пленочному кипению сопровождался существенным повышением температуры. За процессом наблюдали через микроскоп. Из нижней границы горячей зоны вдоль проволочки поднималась конусообразная паровая струя. Длина горячей зоны заметно флюктуировала.

Осциллограммы транспортного тока регистрировались на осциллографе С9-8 с изменением временного шага от 1 мс до 0.5 с при длине реализаций 2048 точек, что дало возможность охватить частотный интервал от 10^{-3} до 10^2 Гц. Рассчитанные по экспериментальным осциллограммам пленочного кипения спектральные плотности в широком диапазоне вводимой мощности имели вид $1/f^\alpha$. Значения показателя α зависели от вводимой тепловой мощности. В том случае, когда пленочное кипение было достаточно устойчивым, показатель α был близок к единице, то есть в системе наблюдался $1/f$ -шум в широком диапазоне управляющих параметров. С уменьшением мощности вблизи потери устойчивости пленочного кипения картина изменилась. Амплитуда флюктуаций горячей зоны возрастила. Внешне картина по-

ходила на перевернутую кучу песка, а флуктуации длины горячей зоны – на сход лавин. Показатель α в области потери устойчивости пленочного кипения был близок к 2.

На рис.1 приведены типичные осциллограммы для двух описанных режимов. Осциллограмма 1 на рис.1 соответствует относительно устойчивому пленочному кипению на вертикальном нагревателе, осциллограмма 2 – потере устойчивости пленочного режима. Функции распределения амплитуд колебаний в первом случае были приблизительно симметричны с максимумом вблизи нуля и походили на гауссовские. Во втором случае функции распределения вблизи нуля расщеплялись на два максимума и имели более вытянутые "хвосты". Для количественного анализа функций распределения и для выявления экспоненциального или степенного поведения распределения "лавин" в области больших выбросов требуются более длинные реализации.

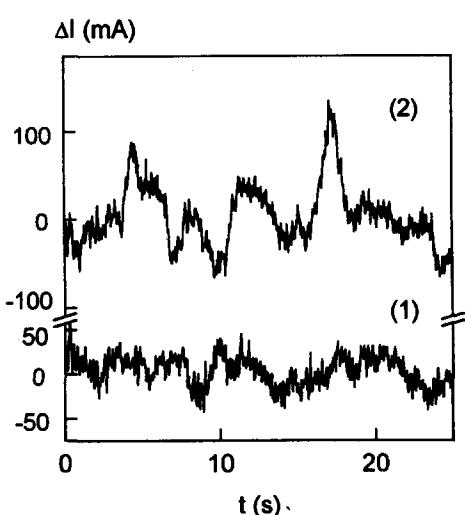


Рис.1. Осциллограммы флуктуаций транспортного тока при двух режимах пленочного кипения на вертикальном нагревателе. 1 – режим с $1/f$ -спектром, 2 – режим с $1/f^2$ -спектром

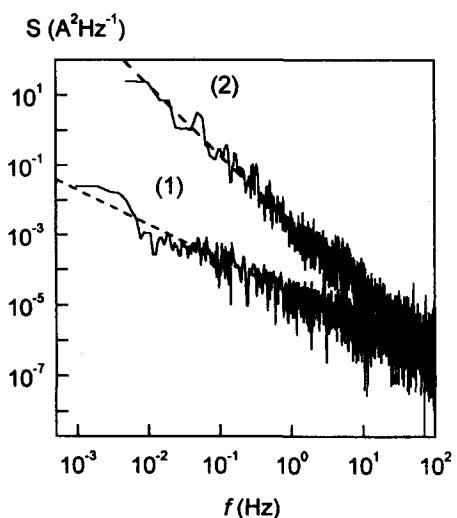


Рис.2. Частотные зависимости спектральной плотности флуктуаций для двух режимов пленочного кипения. Штриховые линии – зависимости $1/f$ (1) и $1/f^2$ (2)

На рис.2 приведены спектральные плотности флуктуаций для двух режимов пленочного кипения в исследованном диапазоне частот, полученные "сшивкой" спектров для отдельных осциллограмм с различным временным шагом. Штриховой линией на рис.2 показаны зависимости $1/f$ и $1/f^2$. Из данного рисунка видно, что $1/f^\alpha$ -поведение прослеживается на протяжении пяти десятичных порядков.

Необходимо подчеркнуть, что $1/f^\alpha$ -поведение спектральной плотности флуктуаций наблюдалось для всех осциллограмм в области пленочного кипения и в широком диапазоне вводимой мощности. При этом низкочастотная граница указанного поведения наблюдалась только в том случае, когда вводимая мощность была слишком велика и верхняя граница горячей зоны достигала конца проволочки. Иными словами, критическое поведение, о котором свидетельствуют $1/f^\alpha$ -спектры, поддерживается в широком интервале изменения и без подстройки управляющих параметров.

Таким образом, в настоящей работе обнаружен широкополосный $1/f^\alpha$ -шум при пленочном кипении жидкости. Поведение спектров в широком диапазоне внешних параметров и общая картина процесса позволяют высказать предположение о сходстве исследованного процесса с явлением самоорганизованной критичности.

1. Ш.М.Коган, УФН **145**, 285 (1985).
2. Р.О.Зайцев, Письма в ЖЭТФ **58**, 978 (1993).
3. Ю.Л.Климонтович, *Статистическая теория открытых систем*, ТОО "Янус", Москва, 1995.
4. Ю.Е.Кузовлев, ЖЭТФ **111**, 2086 (1997).
5. Г.П.Жигальский, УФН **167**, 623 (1997).
6. P.Bak, C.Tang, and K.Wiesenfeld, Phys. Rev. **A38**, 364 (1988).
7. С.Л.Гинзбург, Н.Е.Савицкая, Письма в ЖЭТФ, **68**, 688 (1998).
8. G.F.Held, D.H.Solina, D.T.Keane et al., Phys. Rev. Lett. **65**, 1120 (1990).
9. A.Mehta, J.M.Luck, and R.J.Needs, Phys. Rev. **E53**, 92 (1996).
10. В.П.Коверда, В.Н.Скоков, В.П.Скрипов, Письма в ЖЭТФ **63**, 739 (1996).
11. В.П.Коверда, В.Н.Скоков, В.П.Скрипов, ЖЭТФ **113**, 178 (1998).
12. V.P.Koverda and V.N.Skokov, Physica **A262**, 376 (1999).
13. S.A.Zhukov, L.F.Bokova, and V.V.Barelko, Int. J. Heat. Mass. Transfer **26**, 269 (1983).
14. В.В.Барелко, С.А.Жуков, ТВТ **33**, 73 (1995).