

К ВОПРОСУ О СВОЙСТВАХ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

Осипов А.А. (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», Обнинск, Россия)

Введение

Сложный характер изменения параметров системы относительно своего среднего значения (пульсации) является фундаментальным свойством многих физических процессов. В определенных случаях, анализ статистических характеристик пульсаций параметров позволяет получить информацию о состоянии наблюдаемой системы. Например, анализ пульсаций нейтронного поля в нейтронно – физических системах (реакторы «нулевой» мощности) позволяет определить кинетические параметры системы (эффективность запаздывающих нейтронов, время жизни мгновенных нейтронов и др.) [1]. В энергетических реакторах пульсационный характер свойственен и тепло-гидродинамическим полям. С практической стороны важным свойством пульсационного поля является корреляция или способность системы «запоминать» возмущения. Память системы является проявлением специфического свойства физической системы – масштабной инвариантности [2,3], или иначе говоря, симметрии физических законов относительно масштабных преобразований. Таким образом, если система обладает свойством масштабной инвариантности, то пульсационное поле такой системы состоит из самоподобных возмущений различного масштаба, эволюция которых сопровождается изменением их размеров. Очевидно, что если система обладает свойством масштабной инвариантности, то это может представлять как фундаментальный, так и практический интерес, например, с точки зрения контроля различных параметров системы.

Под масштабной инвариантностью (скейлингом) подразумевается сохранение инвариантности уравнений при масштабном изменении расстояний и времени, например уравнения Навье-Стокса инвариантны к преобразованиям вида

$$r \rightarrow \lambda r, \quad t \rightarrow \lambda^{1+\alpha} t, \quad v \rightarrow \lambda^{-\alpha} v,$$

где параметр α определяет закон самоподобия системы. В общем случае показатель α может находиться в некотором интервале значений $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ [4].

В настоящее время скейлинг изучается в рамках мультифрактального анализа, т.к. фракталы по определению масштабно инвариантны. Теория фракталов [5, 6] сейчас широко используется для описания свойств самоподобия и сложного скейлинга, наблюдаемых в самых разных физических ситуациях [7–10].

При описании свойств фракталов вводят структурные функции:

$$S_q = \langle (g(x + \lambda) - g(x))^q \rangle \sim \lambda^{qH(q)}$$

Показатель степени $H = H(1)$ (индекс Херста [10]) по смыслу соответствует α и определяет закон распыления диффузионного пакета во времени t^H . В общем случае $0 \leq H \leq 1$. Случай $H = 1/2$ соответствует классической броуновской диффузии, случай $H > 1/2$ соответствует аномальной диффузии (супердиффузии), а случай $H < 1/2$ соответствует субдиффузии. Если $H(q) = \text{const}$, то процесс является монофрактальным, если H зависит от q , то процесс мультифрактальный.

В последнее время появилось большое число экспериментальных и теоретических работ, посвященных вопросам массопереноса в турбулентных средах [11–15]. Оказалось, что диффузия в турбулентных средах может существенно отличаться от классической броуновской диффузии, а именно ширина диффузионного пакета растет по закону t^H . При этом нормальная форма диффузионного пакета может не сохраняться.

Для целого ряда практических задач несомненную ценность представляет наличие строгого математического подхода к анализу сложной структуры процессов различной природы. Простые, или монофрактальные, сигналы (например: $1/f$ – шум, винеровский случайный процесс и т.д.) являются однородными в том смысле, что их скейлинговые характеристики остаются неизменными в любом диапазоне масштабов. Спектр таких сигналов, имеющий вид $\sim f^{-\beta}$, не изменяется в широком частотном диапазоне f , т.е. β представляет собой постоянную величину. В работе [16] показано, что спектральная плотность фрактального процесса существует и совпадает с известной степенной зависимостью $\beta = 2H + 1$ только для значений показателя $0 \leq H \leq 1/2$. В интервале $1/2 < H \leq 1$ спектральная плотность не существует, а периодограммная оценка показателя имеет постоянное значение равное $1/2$. Например, для однородной изотропной турбулентности (модель K41) $\beta = 5/3$, следовательно $H = 1/3$.

Целью данной работы являлся анализ структурных (1) и корреляционных (2, 3) функций пульсаций температуры в расплавах тяжелых металлов (свинец, свинец-висмут) в статических и динамических режимах.

$$S_q(n) \sim \sum_{i=1}^{N-n} |g_{i+n} - g_i|^q, \quad n = 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

$$AC(n) \sim \sum_{i=1}^{N-n} g_{i+n} g_i, \quad (2)$$

$$C(n) \sim \sum_{i=1}^{N-n} g_{i+n} g'_i, \quad (3)$$

1 Эксперимент. Статический режим

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. В стальную емкость диаметром 160 мм помещали висмут массой 10 кг. Емкость с висмутом помещали в шахтную печь и проводили разогрев до температуры выше плавления висмута в зависимости от основной задачи эксперимента. Измерения вертикального распределения температур проводилось при помощи температурного зонда, состоящего из хромель-алюмелевых термопар толщиной 1мм, расположенных с вертикальным смещением (~ 3 мм) относительно друг друга. Показания термопар фиксировались 1 раз в секунду. В зависимости от условий эксперимента наблюдали за изменением как абсолютных, так и пульсационных составляющих температур в объеме металла и над его поверхностью. Амплитуды пульсаций температуры в жидком висмуте (рис.2) оказались на порядок меньше пульсаций температуры в газовой фазе (рис.3) и составили порядка $1-2^\circ\text{C}$ и $10-20^\circ\text{C}$ соответственно. Картина локальных максимумов ветвей коэффициентов в обоих случаях имела ветвящийся, древообразный вид (рис. 4–5), характерный фрактальным структурам. Показатели степени $H(1)$ (индекс Херста) составили порядка $\sim 0.45-0.6$. Однако в случае пульсаций в газе ветвящийся вид линий локальных максимумов ветвей коэффициентов наблюдался на существенно меньших масштабах. Аналогичным свойством обладали автокорреляционные и структурные функции пульсаций температур (рис. 6–7). Анализ взаимных корреляционных функций выявил высокий уровень корреляций, как в газовой фазе, так и в жидком висмуте. В случае пульсаций в жидком висмуте наблюдался закономерный сдвиг максимумов взаимных корреляций, чего не наблюдалось в газовой фазе, что могло быть связано как с более интенсивным движением в газовой фазе, так и с гораздо меньшим масштабом корреляций.

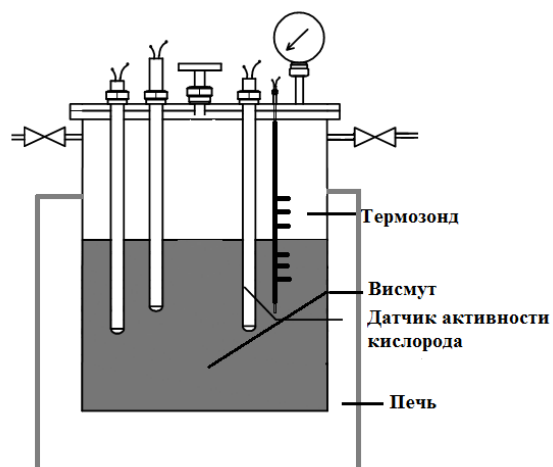


Рис. 1. Схема статической установки

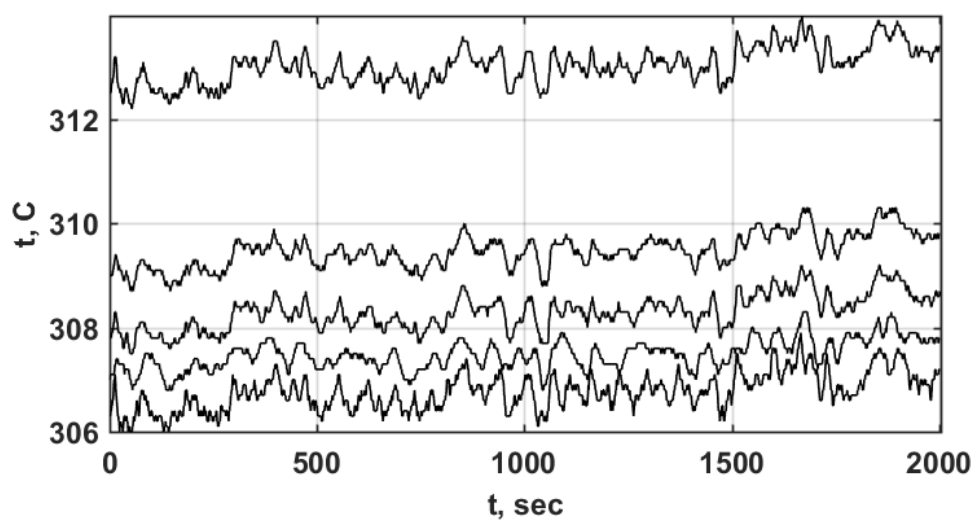


Рис. 2. Пульсации температуры в жидком висмуте

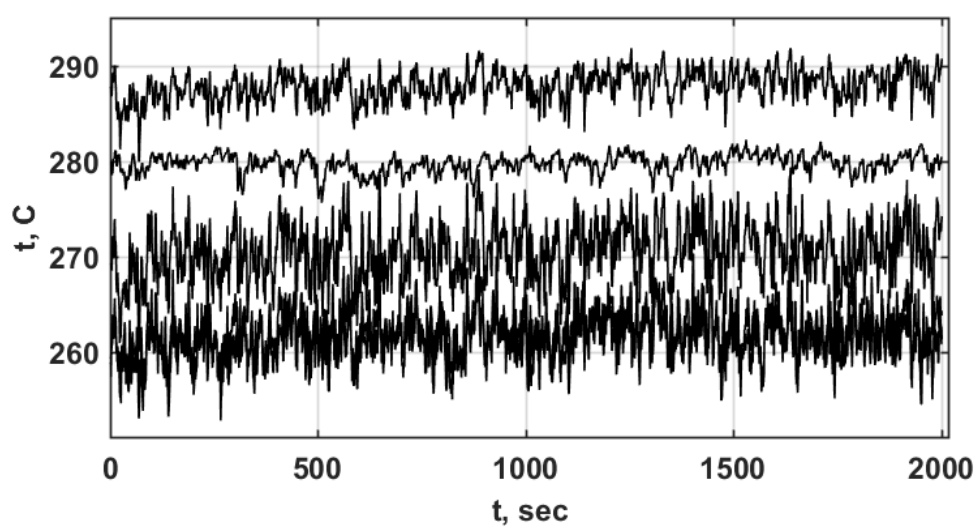


Рис. 3. Пульсации температуры в газовой фазе над расплавом висмута

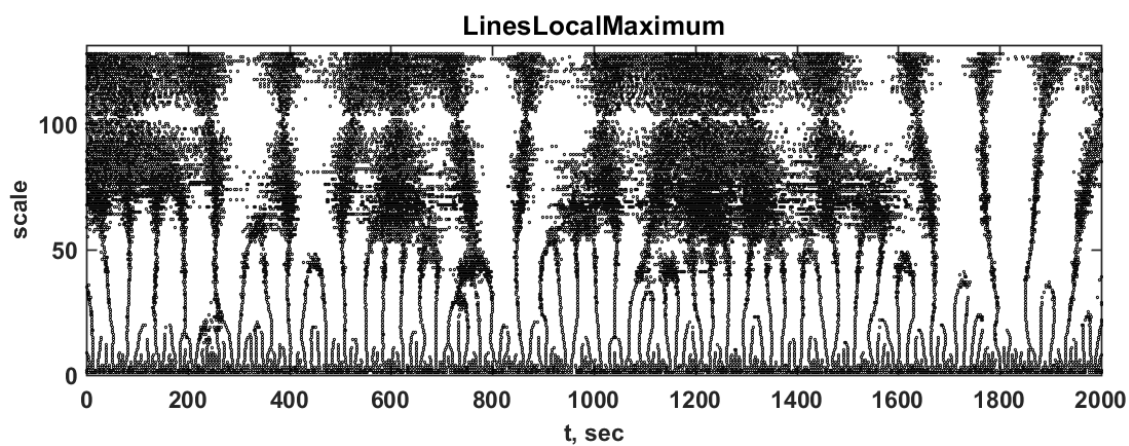


Рис. 4 Линии локальных максимумов вейвлет коэффициентов температуры в жидком висмуте

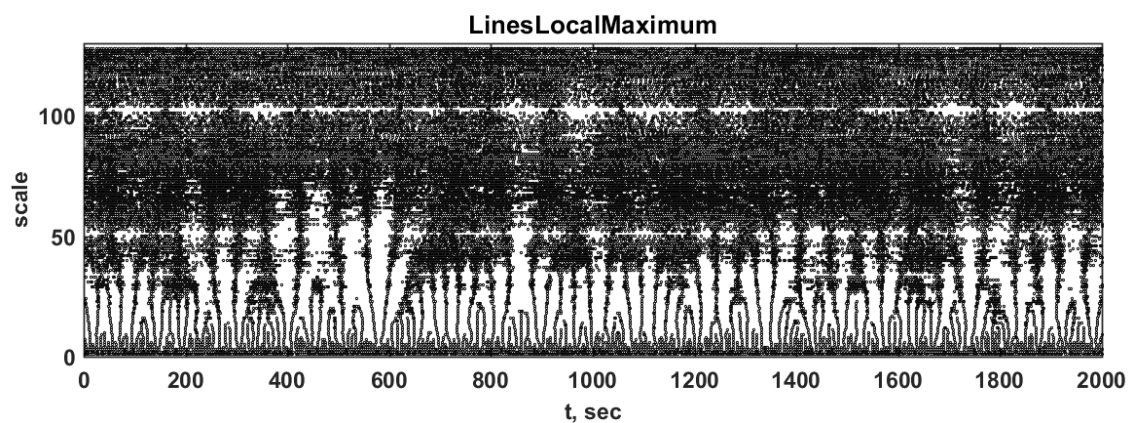


Рис. 5 Линии локальных максимумов вейвлет коэффициентов температуры в газовой фазе

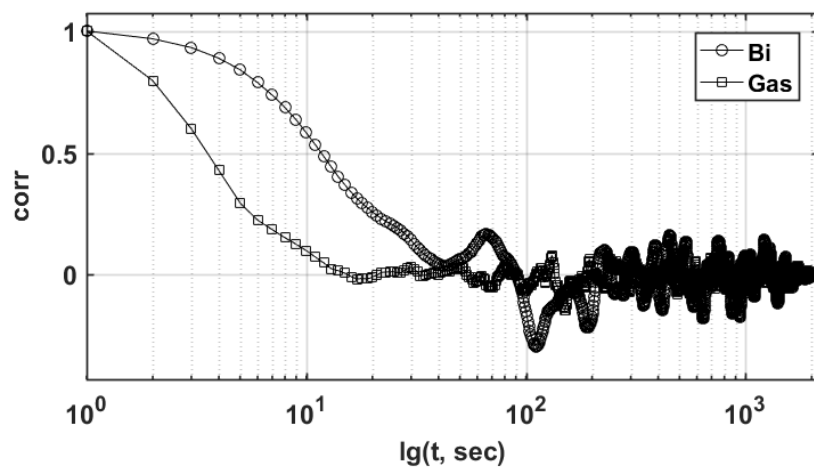


Рис. 6

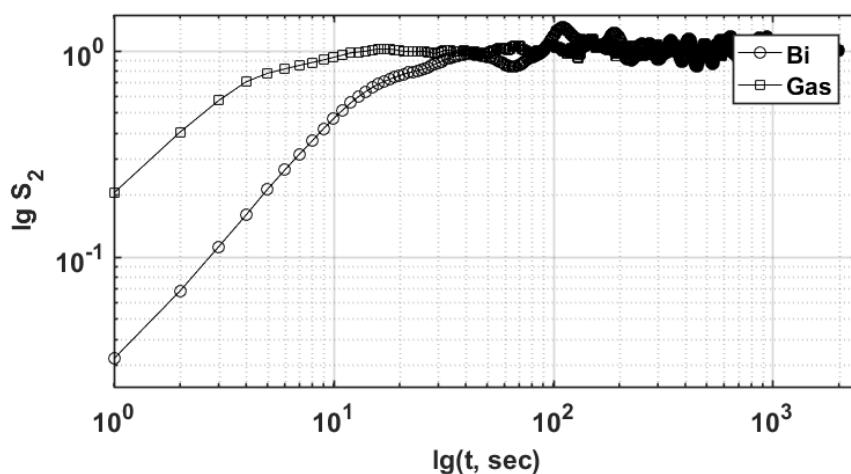


Рис. 7

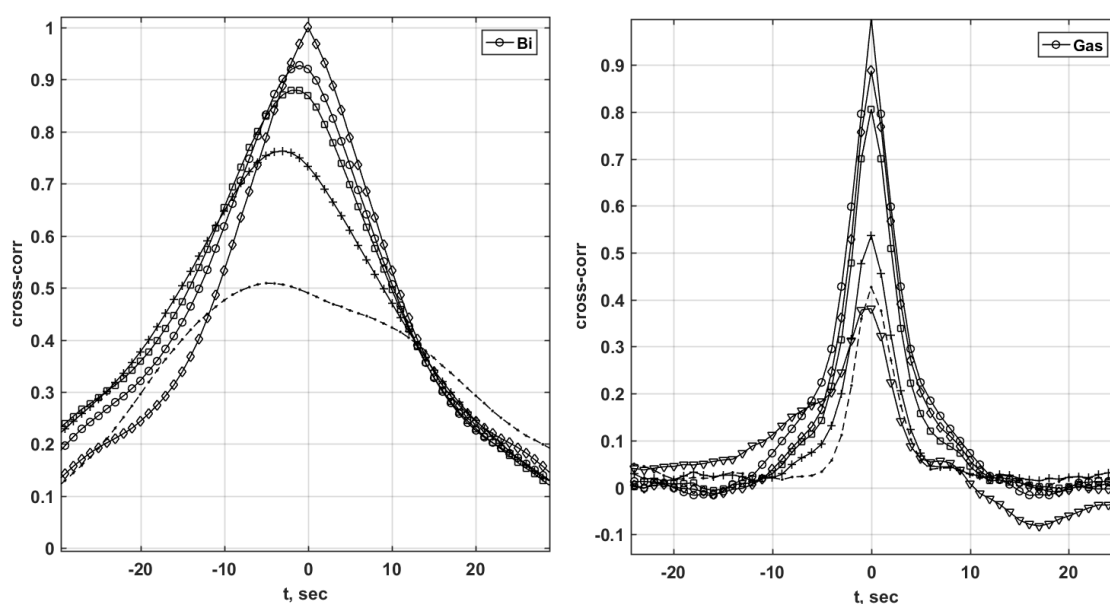


Рис. 8

2 Эксперимент. Динамический режим

Измерения температур проводили на входе и выходе из рабочего участка (рис. 9) стенда «ТТ-2М» расстояние между термопарами составило порядка 2 м. Измерения проводили термопарами хромель-алюмель, толщиной 0.5 мм с изолированным спаем. Термопары располагались в стальных чехлах с толщиной стенки 2 мм, чехлы были введены в поток теплоносителя. Показания термопар фиксировались 3 раза в секунду.

Основные технологические параметры стенда «ТТ-2М»:

- рабочая температура в контуре $200 \div 540$ °C;
- расход теплоносителя по основному контуру – до 5 м³/ч;
- теплоноситель – эвтектический сплав 44,5%Pb-55,5%Bі;
- объем теплоносителя ~ 200 л.

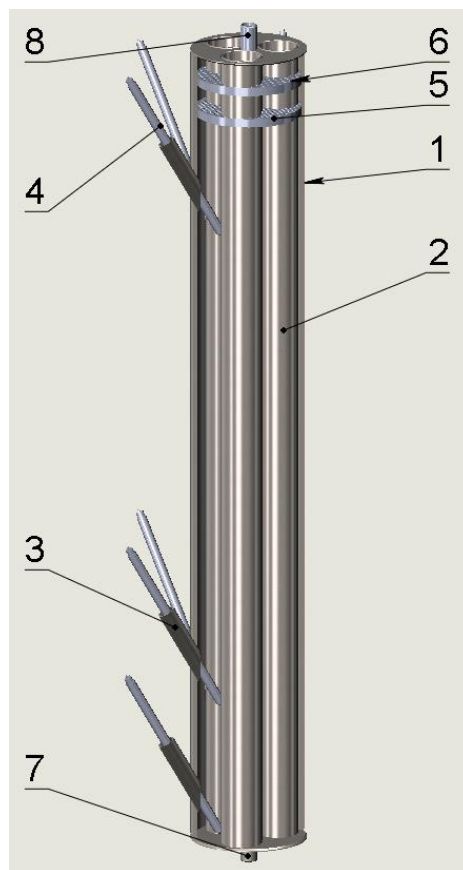


Рис. 9. Схема (сечение трехмерной модели) рабочего участка стенда ТТ-2М:
 1 – корпус; 2 – вытеснитель; 3 – монтажный патрубок ДАК; 4 – ДАК; 5 – нижняя решетка;
 6 – верхняя решетка; 7 – входной патрубок; 8 – выходной патрубок

Рабочий участок имеет прямоточную конструкцию. Теплоноситель (эвтектический сплав Pb-Bi), попадая в полость корпуса (1) через входной патрубок (7) и внутреннюю входную трубу, устремляется в направлении выходного патрубка (8). По мере прохождения объема полости корпуса рабочего участка теплоноситель омывает расположенные внутри вытеснители (2), чувствительные элементы ДАКов (4), нижнюю (5) и верхнюю (6) решетки. Контроль температуры ведется по двум термопарам, установленным на входе и выходе рабочего участка. Расход теплоносителя через рабочий участок дросселируется вентилем, расположенным на входе и контролируется магнитным расходомером. Общая картина изменений температур на входе и выходе из рабочего участка приведена на рис.10–12.

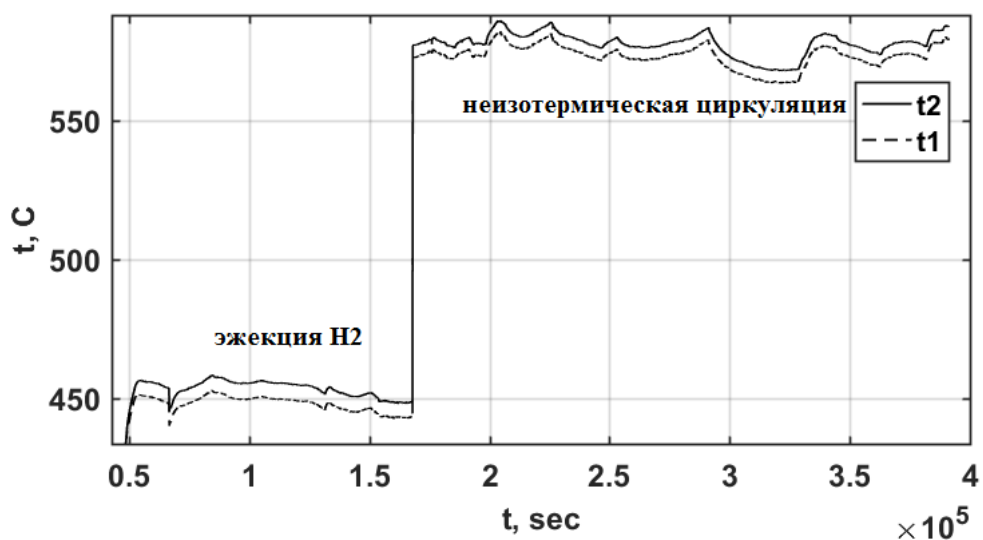


Рис.10

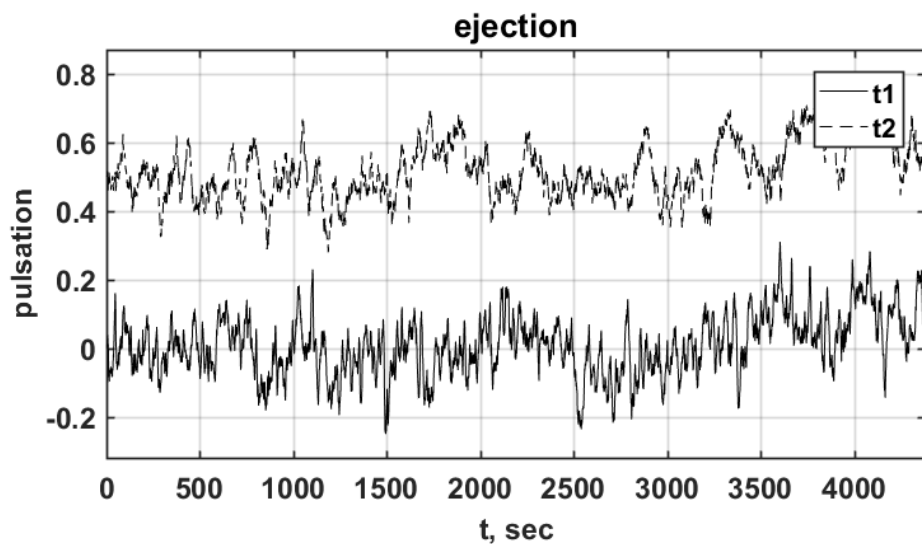


Рис.11

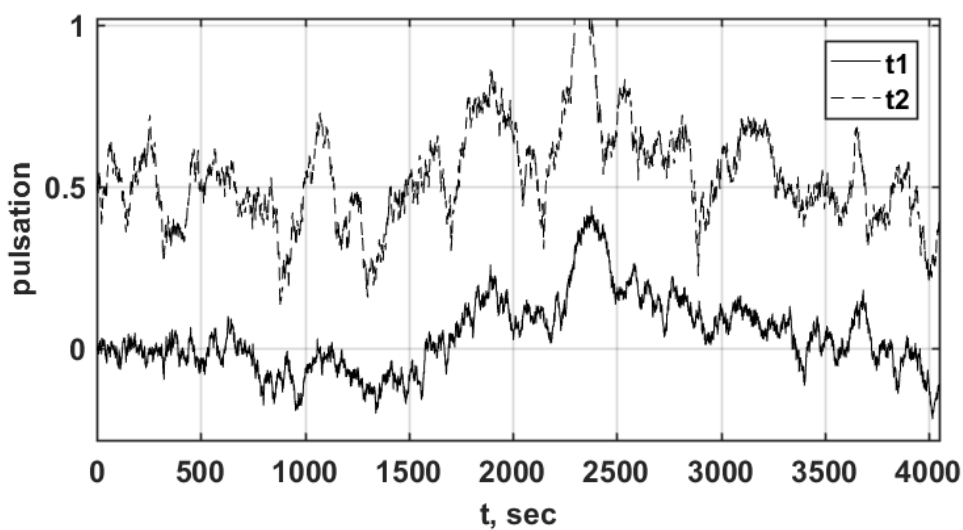


Рис.12

Амплитуда пульсаций слабо зависела от условий эксперимента и составляла порядка $0.2 ^\circ\text{C}$. Картина локальных максимумов вейвлет коэффициентов в обоих

случаях имела ярко выраженный ветвящийся, древообразный вид (рис. 4–5), характерный фрактальным структурам. Показатели степени $H(1)$ (индексы Херста) составили порядка $\sim 0.4\text{--}0.45$. Однако в случае пульсаций в режиме эжекции водорода степенная зависимость структурной функции наблюдалась на меньших временных масштабах, особенно на выходе из рабочего участка (рис. 14), что могло быть связано с повышенным газосодержанием в верхней части рабочего участка. Косвенным признаком повышенного газосодержания в верхней части рабочего участка был значительный рост амплитуды пульсаций датчиков активности кислорода расположенных по вертикали рабочего участка в режиме эжекции водорода (рис. 15). Уменьшение временного масштаба корреляций по всей видимости приводило к потере или существенному снижению корреляций температур на входе и выходе из рабочего участка в режиме эжекции водорода. В режиме неизотермической циркуляции анализ взаимных корреляций температуры на входе и выходе из рабочего участка показал высокий уровень корреляций вплоть до значений 1 (в зависимости от масштаба возмущений) при этом характерное время запаздывания составило порядка 20 секунд, стабильно наблюдаемое на масштабах тепловых возмущений вплоть до $0.1\text{--}0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характерное время запаздывания 20 секунд примерно соответствовало гидродинамическим характеристикам рабочего участка.

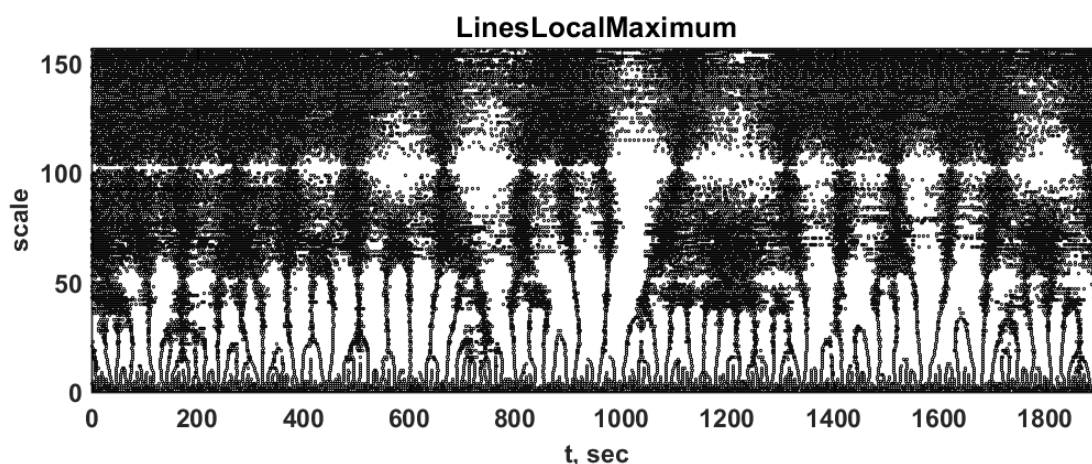


Рис. 13

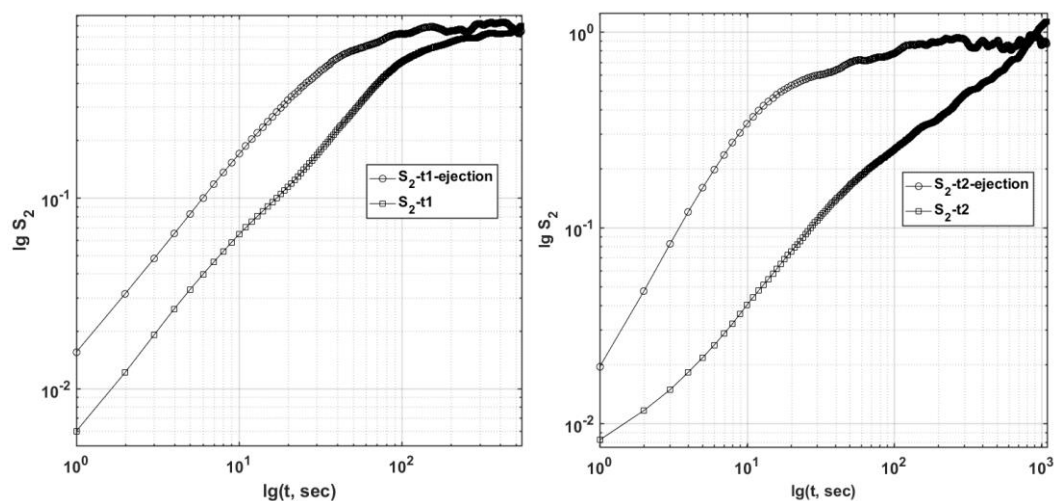


Рис. 14

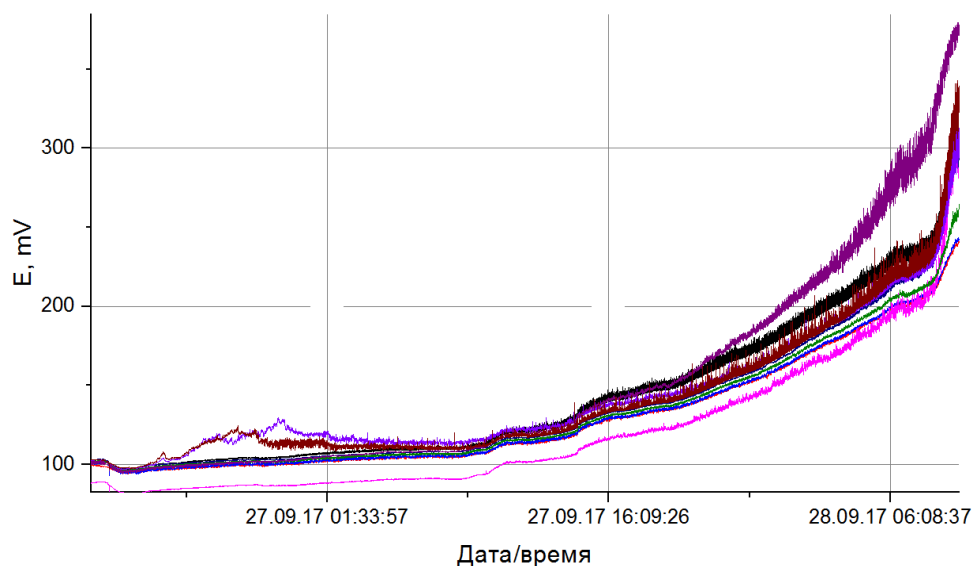


Рис.15

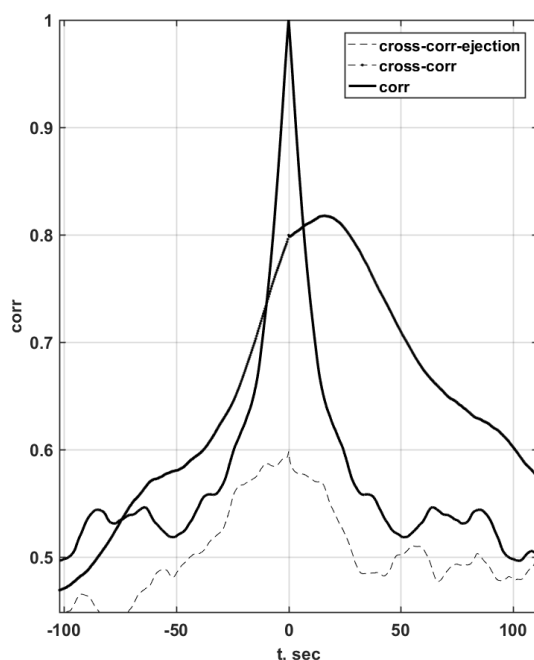


Рис.16

Заключение

В данной работе исследованы корреляционные и структурные функции пульсаций температуры и ТДА кислорода в тяжелых жидких металлах (свинец, висмут, натрий) в статических и динамических режимах. Показано, что пульсации температуры в жидком металле связаны с процессами тепломассопереноса, характеризуются длинными корреляциями и могут быть описаны фрактальными моделями как в условиях естественной конвекции, так и в условиях вынужденного движения металла.

Пульсационный характер изменения параметров системы позволяет получить информацию о состоянии наблюдаемой системы. В зависимости от задачи, данная информация может быть как дополнительной, так и основной. С практической стороны, пульсации используются и могут быть использованы при создании корреляционных датчиков и для совершенствования диагностических методов контроля различных параметров в ТЖМТ.

Для целого ряда практических задач несомненную ценность представляет наличие строгого математического подхода к представлению пульсаций температуры в жидком металле. Например, полученные результаты позволяют обосновать целесообразность исследования свойств решений уравнений тепломассопереноса с фрактальными граничными условиями.

Пульсации связаны с процессами тепломассопереноса. Несмотря на определенный успех в проблеме установления количественных связей структурных свойств пульсаций с процессами переноса, в общем случае данный вопрос ждет своего разрешения.

Литература

1. Кебадзе Б.В. Контроль теплогидравлических параметров и диагностика состояния ядерных энергетических установок с применением статистических методов: Дис. д-ра тех. наук, ГНЦ РФ – ФЭИ. Обнинск, 2007.
2. Будаев В.П., Савин С.П., Зелёный Л.М. Наблюдения перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 9, с. 905–952.
3. Будаев В.П. Обобщенная масштабная инвариантность и лог-пуассоновская статистика турбулентности краевой плазмы в токамаке Т-10 // Физика плазмы. 2008. Т. 34, № 10, с. 867–884.
4. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций: Перм. гос. техн. ун-т. Часть II. Пермь, 1999. 136 с.
5. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // УФН, Т. 177, № 8, С. 859–876, 2007
6. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
7. Дубовиков М.М., Старченко Н.В. Эконофизика и фрактальный анализ финансовых временных рядов // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 7, с. 779–786.
8. Лыков И.А., Охотников С.А. Влияние изменения функции Хёрста на возможности экономического прогнозирования // Фундаментальные исследования. 2013, №10 (7), с. 1539–1544.
9. Калуж Ю.А., Логинов В.М. Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. 2002. Т.5, № 4 (12), с. 29–37.
10. Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. Vol. 116. pp. 770–808.
11. Бакунин О.Г. Стохастическая неустойчивость и турбулентный перенос. Характерные масштабы, инкременты, коэффициенты диффузии // УФН, Т. 185, № 3, С. 271–305, 2015
12. Зыбин К.П., Сирота В.А. Модель вытягивающихся вихрей и обоснование статистических свойств турбулентности// УФН, Т. 185, № 6, С. 593–613, 2015
13. Учайкин В.В. Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы // УФН, Т. 173, № 8, С. 847–875, 2003
14. Бакунин О.Г. Корреляционные и перколяционные свойства турбулентной диффузии // УФН, Т. 173, № 7, С. 757–952, 2011
15. Учайкин В.В. Дробно-дифференциальная феноменология аномальной диффузии космических лучей // УФН, Т. 183, № 11, С. 1175–1222, 2013
16. Кулешов Е.Н, Грудинин Б.Н. Спектральная плотность фрактального броуновского процесса // Автометрия, Т.49, №3, 2013 pp.18–24