

**Кухарев А. Л.**

*Донбасский государственный технический университет*

*E-mail: alex.kuharev@mail.ru*

## **О ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ РАСПЛАВА**

*Рассмотрена задача анализа перемежаемости пульсаций скорости при электровихревых течениях расплава в полусферической ванне установки с осесимметричными электродами. Используются различные методы обработки результатов нестационарного моделирования: дискретное вейвлет-преобразование временных рядов, статистические методы анализа приращений скорости, алгоритм разделения турбулентных и нетурбулентных событий в сигнале скорости. Рассчитаны коэффициенты перемежаемости в различных зонах ванны расплава. Показано, что наибольший уровень перемежаемости возникает в области соударения струи с нижней стенкой ванны.*

**Ключевые слова:** *расплав, электровихревое течение, турбулентность, дискретное вейвлет-преобразование, перемежаемость.*

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Проектирование высокоэффективных плавильных печей и агрегатов обработки, разлива и литья металлургических расплавов тесно связано с моделированием и оптимизацией турбулентных течений расплава для обеспечения интенсификации процессов гомогенизации температуры, химического состава металла и улучшения других технологических показателей [1, 2].

Данная статья является продолжением работ [3–5], в которых нами численно исследуются различные аспекты турбулентности, возникающие при электровихревых течениях (ЭВТ) расплава в полусферической ванне установки с осесимметричными электродами. В вышеуказанных работах приведены особенности конструкции данной установки и методика моделирования. Отметим, что расчетные профили средней скорости и данные по интенсивности пульсаций удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [6].

В работах [4, 5] показано, что интенсивность турбулентных возмущений распределена неравномерно по объему ванны и по времени. Для области нижней стенки ванны характерны резкие вспышки высокой тур-

булентной активности, сопровождаемые наличием большого количества мелкомасштабных вихрей. Эти турбулентные вспышки на вейвлет-спектрограммах имеют вид пиков, проявляющихся в случайные моменты времени [5]. Промежутки между этими пиками характеризуются малой интенсивностью и различной протяженностью. В то же время в центральной части ванны, на ее периферии, а также вблизи поверхности расплава турбулентные вспышки менее выражены. Описанное выше явление, характеризующее в общем случае нарушение глобальной однородности турбулентности, получило название перемежаемости [7]. Перемежаемость также распространяется на температурные поля и поля концентраций, в которых образуются анизотропные зоны мелкомасштабного перемешивания.

**Постановка задачи.** С точки зрения нелинейной динамики перемежаемость является одним из свойств хаотических систем и может быть рассмотрена с помощью таких подходов, как метод сингулярных возмущений, мультифрактальная теория и др. [7]. В прикладных расчетах исследование перемежаемости, как правило, основывается на применении различного рода декомпозиций. Для декомпозиции сигналов в последнее время широко применяется многоуровневый

анализ (англ. MRA — multiresolution analysis), при использовании которого сигнал скорости может быть разделен на частотные составляющие, что позволяет локализовать турбулентные всплески по масштабу и времени [8, 9].

В классическом подходе к исследованию мелкомасштабной турбулентности, основоположником которого является А. Н. Колмогоров, анализируется статистика пространственных или временных приращений скорости [10].

При количественном анализе пульсаций скорости обычно используется коэффициент перемежаемости, который определяется для заданной точки потока как относительное время существования турбулентных всплесков [11, 12].

**Целью** настоящей работы является анализ основных показателей перемежаемости пульсаций скорости в ванне расплава при ЭВТ.

**Объект исследования** — токопроводящие расплавы в технологических установках.

**Предмет исследования** — нестационарные электровихревые течения в расплаве.

**Задачи исследования:**

– выявление перемежаемости с помощью многоуровневого разложения временного ряда сигнала скорости и анализа статистики приращений скорости;

– расчет коэффициента перемежаемости в различных зонах ванны расплава.

**Методика исследования.** Исследовались нестационарные гидродинамические процессы в полусферической ванне диаметром 188 мм, заполненной эвтектическим сплавом «индий — галлий — олово» при токе в электродах 250 А. Трехмерная геометрическая модель данной установки представлена нами в работе [3]. Как и в работах [4, 5], детально анализируются процессы в контрольных точках, располагаемых на различной высоте плоского сечения, проходящего через ось ванны. Точка 1 располагалась в центральной области ванны, точка 2 — вблизи нижней стенки, точка 3 — вблизи поверхности расплава,

точка 4 — вблизи центра вихря. Координаты этих точек приведены нами в работе [4].

Обработка данных и построение графиков проводились в пакете Matlab, в том числе с использованием элементов программного кода [13].

**Изложение материала.** Так как интенсивные пульсации скорости при принятых условиях моделирования возникали спустя ~20 с после подачи электрического тока [4], то анализ данных проводился в интервале времени  $t$  [20, 100] с, т. е. исследуемый период  $T$  составлял 80 с.

Наиболее часто при применении многоуровневого анализа используется дискретное вейвлет-преобразование, которое в упрощенном виде для любого сигнала  $x(t)$  может быть записано следующим образом [8]:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} W^x(m, n) \cdot \psi_{mn}^*(t), \quad (1)$$

где  $W^x(m, n)$  — может рассматриваться как операция цифровой фильтрации, при которой сигнал пропускается через фильтры нижних и верхних частот;  $\psi_{mn}^*(t)$  — вейвлет-функция.

В качестве вейвлет-функции нами использовался симлет восьмого порядка, который является модифицированной версией вейвлетов Добеши с повышенной симметрией [9]. Отметим, что нами использовалась процедура дискретного вейвлет-преобразования с максимальным перекрытием (англ. MODWT — Maximal overlap discrete wavelet transform) [14].

На рисунке 1 показано вейвлет-разложение временного ряда скорости в точке 2. Верхний график на рисунке 1 — это исходный временной ряд скорости, а остальные графики представляют собой различные частотные составляющие. В таблице 1 приведены основные характеристики данного девятиуровневого вейвлет-разложения. Первые два уровня с частотными диапазонами 25–50 Гц, 12,4–25,2 Гц были проигнорированы в виду существенной малости их амплитуды и, соответственно, уровня энергии.

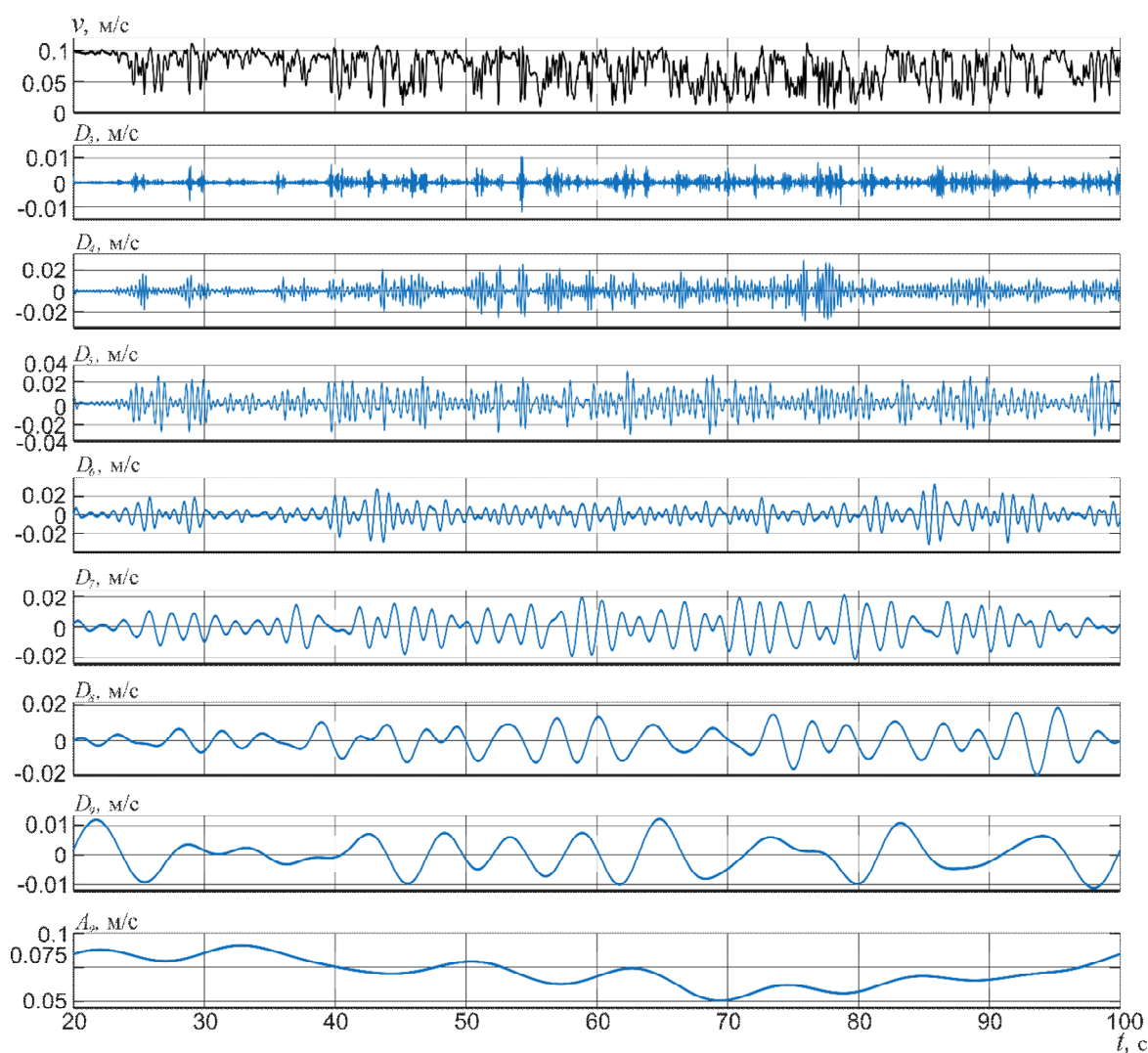


Рисунок 1 — Вейвлет-разложение временного ряда скорости в точке 2

Для данного вейвлет-разложения можно записать следующее выражение:

$$v(t) = A_M(t) + \sum_{m=1}^M D_m(t), \quad (2)$$

где  $M=9$  — количество уровней;  $A_M(t)$  — аппроксимирующий компонент, представляющий самую низкочастотную составляющую вейвлет-преобразования;  $D_m(t)$  — детализирующие компоненты, представляющие более высокочастотную часть вейвлет-преобразования.

Особенности данной вейвлет-декомпозиции достаточно полно отражены

в таблице 1. Каждый уровень вейвлет-коэффициентов занимает определенную полосу в частотной области, при этом центральная частота каждого последующего уровня приблизительно в 2 раза меньше, чем предыдущего. Например, для уровня  $D_1$  центральная частота составляет 37,5 Гц, а для  $D_2$  — 18,8 Гц и т. д. В свою очередь среднее значение вейвлет-коэффициентов в диапазоне  $D_1$ – $D_5$  с увеличением уровня увеличивается, а в диапазоне  $D_6$ – $D_9$  — уменьшается, что обусловлено особенностями цифровой обработки сигнала в пакете Matlab.

**МЕТАЛЛУРГИЯ**

Таблица 1

Основные характеристики вейвлет-преобразования

Уровни	Диапазон частот, Гц	Относительное значение энергии, %	Среднее значение, м/с	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
$D_1$	25–50	0,01	$\sim 1 \cdot 10^{-4}$	не учитываются	
$D_2$	12,4–25,2	0,01	$\sim 2 \cdot 10^{-4}$	не учитываются	
$D_3$	6,21–12,6	0,08	0,0011	0,005	4,0
$D_4$	3,1–6,29	0,89	0,0043	0,002	2,33
$D_5$	1,55–3,14	1,82	0,0067	-0,042	0,57
$D_6$	0,776–1,57	1,57	0,0062	-0,057	1,18
$D_7$	0,388–0,786	1,59	0,0064	-0,007	-0,43
$D_8$	0,195–0,393	1,15	0,0056	-0,048	-0,32
$D_9$	0,0976–0,196	0,78	0,0045	0,039	-0,7
$A_9$	0–0,097	91,92	0,0716	0	-0,74

На основании анализа графиков рисунка 1 можно отметить, что аппроксимирующий компонент  $A_9$  определяет общую тенденцию изменения средней скорости во времени, а детализирующие компоненты отражают различные особенности турбулентных явлений, при этом чем меньше уровень вейвлет-преобразования, тем меньше и размер вихрей. Исходя из нашей работы [5], колебания вейвлет-коэффициентов на уровне  $A_9$  можно интерпретировать как низкочастотные колебания основного крупномасштабного вихря, размер которого сопоставим с размером ванны, а более периодичные колебания, показанные на графике, соответствующем уровню  $D_9$ , можно связать с оборотом этих вихрей в ванне с частотой  $\sim 0,1$  Гц. Уровни  $D_3$ – $D_8$  соответствуют вихрям меньших масштабов.

Также из рисунка 1 видно, что по мере уменьшения уровня вейвлет-преобразования, т. е. увеличения частоты колебаний, сигнал становится все более перемежаемым (прерывистым). Эффекты перемежаемости хорошо наблюдаются на уровнях  $D_3$ – $D_6$ , т. е. в диапазоне частот 0,776–12,6 Гц, соответствующих не только интервалу диссипации, но и инерционному интервалу энергетического спектра [5]. Эти эффекты подтверждаются достаточно большими значениями коэффициента эксцесса (табл. 1), ко-

торый также является одной из оценок перемежаемости [10]. Кроме того, отрицательные значения коэффициентов асимметрии вейвлет-коэффициентов уровней  $D_5$ – $D_8$  могут свидетельствовать о доминировании механизма растяжения вихрей этих масштабов [10], что способствует каскадному процессу передачи кинетической энергии.

На втором этапе нами проводился анализ статистических показателей приращений скорости. Этот анализ базируется на гипотезе Тейлора о замороженной турбулентности, которая предполагает эквивалентность временных и пространственных масштабов. С использованием этой гипотезы характеристики пространственной турбулентности можно рассчитать путем анализа временного ряда скорости в одной точке. Тогда расстояние  $l$  будет определяться произведением значений временного интервала  $\tau$  и средней скорости:  $l = -\tau \cdot \bar{v}$ , и приращение скорости на расстоянии  $l$  можно рассчитать через временное приращение скорости [13]:

$$v_l = v(x+l) - v(x) = v(t+\tau) - v(t), \quad (3)$$

где  $v(x+l)$  и  $v(x)$  — соответственно скорости вдоль оси  $x$  в двух точках, разделенных расстоянием  $l$ ;  $v(t+\tau)$ ,  $v(t)$  — соответственно скорости в разные моменты времени, разделенные временным интервалом  $\tau$ .

На рисунке 2 приведены графики плотности распределения вероятностей (ПРВ) нормированных приращений скорости [13]:

$$v_l^* = \frac{v_l}{\sqrt{2\sigma_v}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_v$  — среднеквадратическое отклонение скорости [4]. Эти графики ПРВ разделены по масштабам:  $v_L = (v_l^*)_{l=L}$ ,  $v_\lambda = (v_l^*)_{l=\lambda}$ ,  $v_\kappa = (v_l^*)_{l=\kappa}$ , где  $L$ ,  $\lambda$ ,  $\kappa$  — соответственно интегральный масштаб, масштаб Тейлора и масштаб Колмогорова, значения которых определены нами в работе [4] ( $L=0,09$  м,  $\lambda=0,001$  м,  $\kappa=0,0001$  м). Пунктирной линией серого цвета на рисунке показаны графики нормального (гауссовского) распределения, построенные также для различных масштабов.

Из рисунка 2, *a* видно, что форма графиков ПРВ для точки 2 неодинакова в каждом масштабе. Вблизи интегрального масштаба  $L$  форма графика ПРВ близка к гауссовской с некоторыми отличиями вблизи вершины распределения. Уже вблизи тейлоровского масштаба форма графика ПРВ отличается от гауссовой обостренной вершиной и тяжелыми хвостами, а на колмогоровском масштабе отличие от гауссовой формы значительно увеличивается и форма графика ПРВ принимает вид растянутой экспоненты (экспоненты с показателем дробной степени меньше 1) [10]. Как результаты вейвлет-декомпозиции, так и графики ПРВ (рис. 2, *a*) подтверждают наличие перемежаемости пульсаций скорости на инерционном интервале и на интервале диссипации энергетического спектра [5].

В отличие от области соударения струи с нижней стенкой ванны (точка 2) вблизи центра вихря (точка 4) уровень перемежаемости гораздо ниже, при этом форма графиков ПРВ нормированных приращений скорости достаточно близка к гауссовской, особенно вблизи вершины распределения (рис. 2, *б*).

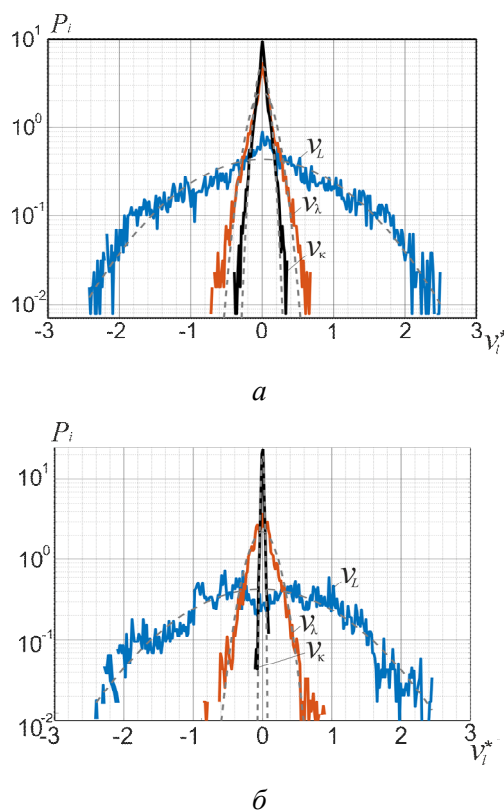


Рисунок 2 — Графики ПРВ нормированных приращений скорости (*a* — в точке 2; *б* — в точке 4)

Далее были рассмотрены статистические моменты приращений скорости  $v_l$   $k$ -го порядка, которые также называются структурными функциями (СФ) [7, 10]:

$$S^k(l) = \langle v_l^k \rangle. \quad (5)$$

В уравнении (5) угловыми скобками обозначена операция определения среднего значения.

А. Н. Колмогоров утверждал, что для однородной и изотропной турбулентности в инерционном интервале СФ второго и третьего порядка обладают масштабной инвариантностью с показателем  $k/3$  [7, 10]. Причем для СФ третьего порядка выведено точное выражение, зависящее от среднего значения скорости диссипации кинетической энергии  $\epsilon$  и масштаба  $l$ :

$$S^3(l) = -\frac{4}{5}\epsilon l. \quad (6)$$

Выражение (6) также называется законом Колмогорова «4/5» [7, 15].

Нами были построены СФ порядка 2–7. В качестве примера на рисунке 3 приведены графики СФ 3-го, 5-го и 7-го порядков. Знак этих функций был изменен, чтобы их графики были расположены в положительной плоскости. Пунктирная прямая линия на графике соответствует колмогоровскому закону «4/5».

Из рисунка 3 видно, что при  $1,5 \leq l/\lambda \leq 5$ , т. е. на участке, близком к инерционному интервалу, график СФ 3-го порядка проходит почти параллельно, но несколько выше линии, соответствующей «колмогоровской» турбулентности. На участке  $5 \leq l/\lambda \leq 17$  форма графиков СФ близка к параболе. А при  $20 \leq l/\lambda \leq 55$ , т. е. на участке, близком к длинноволновому интервалу график СФ 3-го порядка почти точно соответствует закону «4/5».

Такое отклонение графика СФ 3-го порядка от закона «4/5» вблизи тейлоровского масштаба подтверждает наличие перемежаемости и, соответственно, отсутствие однородности и изотропности турбулентности в данной области потока. Кроме того, несоответствие данных графиков может быть обусловлено изменяющимся (случайным) характером скорости диссипации энергии  $\varepsilon$ , входящей в выражение (6) [15].

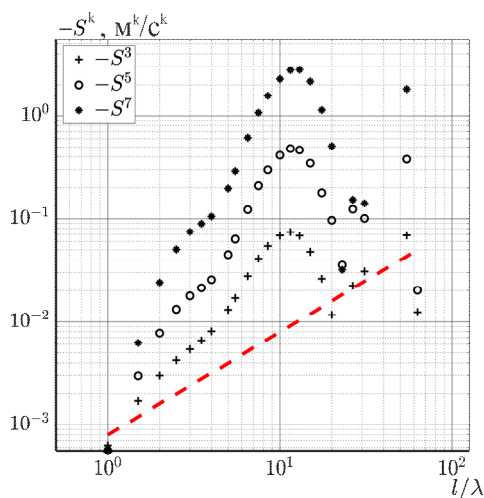


Рисунок 3 — Графики структурных функций скорости в точке 2

Для определения коэффициента перемежаемости нами использовался специальный алгоритм обработки сигналов скорости, составленный на основании рекомендаций, приведенных в работах [11, 12]. Этот алгоритм включает:

1. Расчет функции детектора для эффективного распознавания ламинарных и турбулентных участков в сигнале скорости. Расчет данной функции проводился в два этапа. На первом этапе функция детектора определялась нами с использованием второй производной по времени от сигнала скорости, возведенной в квадрат:

$$F_D(t) = \left( \frac{d^2v}{dt^2} \right)^2. \quad (7)$$

На втором этапе использовалась процедура сглаживания сигнала  $F_D(t)$  с помощью усреднения по методу скользящего среднего в течение принятого временного периода:  $t_c = 7\Delta t$ , где  $\Delta t = 0,01$  с — шаг дискретизации сигнала по времени.

При использовании квадрата второй производной в качестве функции детектора усиливаются только высокочастотные сигналы, обычно возникающие из-за турбулентных всплесков, которые затем достаточно просто отличить от ламинарных возмущений, при этом процедура сглаживания позволяет не учитывать турбулентные провалы и ложные сигналы, вызванные ламинарными пульсациями [11]. Обозначим сглаженное значение функции детектора как  $F_D^c(t)$ .

2. Расчет порогового значения между турбулентными и нетурбулентными событиями. На данном этапе нами использовался метод «двойного наклона», который основывается на использовании графиков ПРВ функции детектора (рис. 4). В работе [16] показано, что на графике ПРВ, построенном в полулогарифмическом масштабе, турбулентная и нетурбулентная части разделены друг от друга, а полигон распределения можно представить в виде двух пря-

мых линий с различным наклоном. Тогда пороговый уровень  $R$  принимается как значение, соответствующее пересечению этих прямых линий. На рисунке 4, б приведен пример применения данного метода для функции  $F_D^c(t)$  сигнала скорости в точке 2.

3. Расчет индикаторной функции путем сравнения значений функции  $F_D^c(t)$  с пороговым значением. Если значение функции детектора на данном шаге дискретизации превышает пороговое значение, то событие считается турбулентным и индикаторной функции  $F_I(t)$  присваивается значение 1, в противном случае индикаторной функции присваивается значение 0:

$$F_I(t) = \begin{cases} 0, & F_D^c(t) \leq R, \\ 1, & F_D^c(t) > R. \end{cases} \quad (8)$$

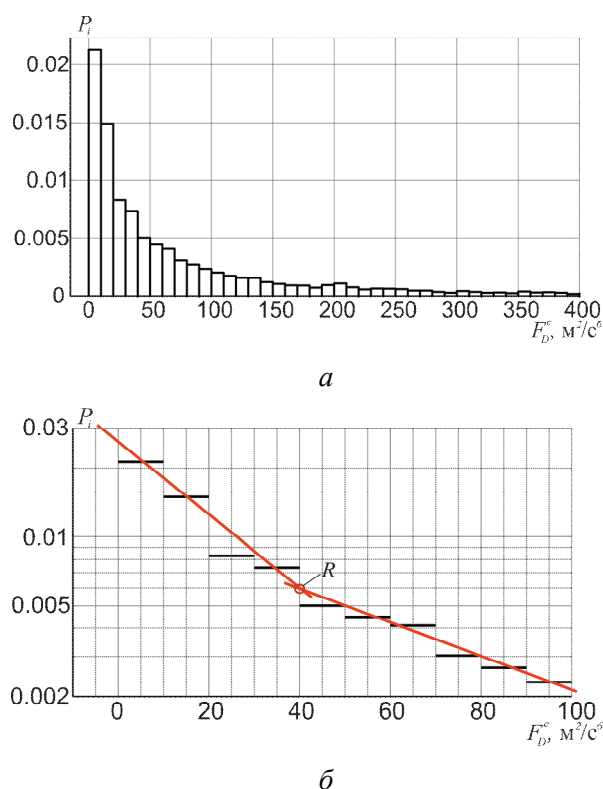


Рисунок 4 — Графики ПРВ функции детектора сигнала скорости в точке 2  
(а — в линейном масштабе;  
б — в полулогарифмическом масштабе)

В соответствии с рекомендациями работы [12] индикаторная функция  $F_I(t)$  подвергалась дополнительной обработке с учетом следующих положений: если время отдельного турбулентного события меньше, чем время  $t_c$ , то это событие считается ламинарным всплеском и функции  $F_I(t)$  присваивается значение 0; если интервал времени между двумя смежными турбулентными событиями короче, чем  $t_c$ , то весь этот интервал считается турбулентным. Данная операция позволяет более точно обрабатывать краевые участки турбулентных пятен [12].

Пример построения индикаторной функции при обработке сигнала скорости в точке 2 показан на рисунке 5.

4. Расчет коэффициента перемежаемости путем усреднения индикаторной функции за соответствующий период времени  $T$ :

$$\gamma = \frac{1}{T} \int_0^T F_I(t) dt. \quad (9)$$

Расчетные значения коэффициента перемежаемости для точек 1–4 соответственно составили: 0,12, 0,49, 0,27, 0,18. Такое распределение коэффициента перемежаемости между контрольными точками приблизительно подобно соответствующему распределению коэффициента интенсивности турбулентных пульсаций для тех же точек: 0,16, 0,33, 0,2, 0,22 [4].

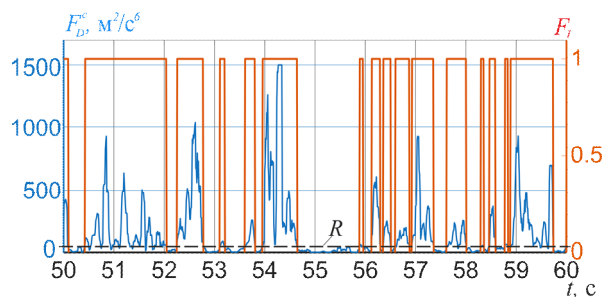


Рисунок 5 — Построение индикаторной функции при обработке сигнала скорости в точке 2

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Применение многоуровневого анализа на основе дискретного вейвлет-преобразования позволило уточнить структуру ЭВТ, а также выявить эффекты перемежаемости, которые обнаруживаются при частоте пульсаций вейвлет-коэффициентов выше 1 Гц, что также подтверждается значениями коэффициентов эксцесса больше 1.

2. Показано, что в области нижней стенки ванны имеет место процесс растяжения вихрей, мерой которого являются отрицательные значения коэффициентов асимметрии.

3. Анализ статистики приращений скорости в точке 2 показал, что форма графиков ПРВ вблизи тейлоровского и колмогоровского масштабов отличается от гауссовой обостренной вершиной и тяжелыми хвостами.

4. С помощью вейвлет-преобразования и анализа статистики приращений скорости доказано, что в области нижней стенки ванны перемежаемость существует не только в интервале диссипации, но и в инерционном интервале энергетического спектра. Показано, что график СФ 3-го порядка отличается от закона Колмогорова «4/5» при  $l/\lambda \leq 20$ ,

причем при  $20 \leq l/\lambda \leq 55$  зафиксирована параболичность графика данной СФ, а при  $20 \leq l/\lambda \leq 55$ , т. е. на участке, близком к длинноволновому интервалу, график СФ 3-го порядка почти точно соответствует закону «4/5».

5. Реализован алгоритм разделения турбулентных и нетурбулентных событий в сигнале скорости на основе применения функции детектора в виде квадрата второй производной по времени и использования метода «двойного наклона» для определения порогового значения данной функции.

6. Показано, что распределение значений коэффициента перемежаемости между контрольными точками 1–4 приблизительно подобно соответствующему распределению коэффициента интенсивности турбулентных пульсаций для тех же точек [4], при этом наибольшее значение коэффициента перемежаемости (0,49) соответствует области соударения струи с нижней стенкой ванны (точка 2).

7. Приведенная методика может применяться при исследовании турбулентных процессов в расплавах плавильных агрегатов и рудовосстановительных печей, а также агрегатов для внепечной обработки и разливки.

### Список источников

1. Развитие теории и технологии газодинамического рафинирования и гомогенизации жидкой стали в ковше / С. В. Куберский, Л. Е. Подлипенская, Р. В. Крестин, А. В. Шапка // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2025. № 10 (84). С. 45–54. EDN KIOXZG

2. Усовершенствование физической модели пульсационного перемешивания расплава в сталеразливочном ковше / С. В. Куберский, Р. В. Крестин, Р. Н. Саратовский, Я. Ю. Сервитовский // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2023. № 2 (76). С. 21–29. EDN KWLVRM

3. Кухарев А. Л. Моделирование процессов перемешивания при электровихревых течениях расплава // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2025. № 8 (82). С. 27–35. EDN JMUJFJ

4. Кухарев А. Л. Статистические характеристики пульсаций скорости при электровихревых течениях расплава // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2025. № 9 (83). С. 39–48. EDN IVGZDO

5. Кухарев А. Л. Частотные характеристики пульсаций скорости при электровихревых течениях расплава // *Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2025. № 10 (84). С. 55–62. EDN KIQYMQ

6. Ивочкин Ю. П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами : дис. ... д-ра техн. наук. М. : [б. и.], 2015. 407 с.
7. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели. Москва — Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 292 с. EDN TJOAIJ
8. Le T. H., Nguyen, D. A. Orthogonal-based wavelet analysis of wind turbulence and correlation between turbulence and forces // *Vietnam Journal of Mechanics*. Vol. 29. Iss. 2. P. 73–82.
9. Иванов В. Э., Чье Е. У. Модульные вейвлет-фильтры: модели, алгоритмы и средства. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2020. 175 с. EDN VGDKVL
10. Frisch U. *Turbulence. Legacy of Kolmogorov*. Cambridge : Cambridge University Press, 1995. 296 p.
11. Veerasamy D., Atkin C. A rational method for determining intermittency in the transitional boundary layer // *Experiments in Fluids*. 2020. Vol. 61. Art. 11.
12. Canepa E., Ubaldi M., Zunino P. Experiences in the application of intermittency detection techniques to hot-*lm* signals in transitional boundary layers // *Proceeding of 16th symposium on measuring techniques in transonic and supersonic flow in cascades and turbomachines (Cambridge, 23–24 September 2002)*. Cambridge : Cambridge University Press, 2002. P. 2077–2085.
13. An open source package to perform basic and advanced statistical analysis of turbulence data and other complex systems / A. Fuchs [et al.] // *Physics of fluids*. 2022. Vol. 34. Iss. 10. Art. 101801. DOI: 10.1063/5.0107974 EDN JESHGY
14. Cornish C. R., Bretherton C. S., Percival D. B. Maximal overlap wavelet statistical analysis with application to atmospheric turbulence // *Boundary-Layer Meteorology*. 2006. Vol. 119. No. 2. P. 339–374. DOI: 10.1007/s10546-005-9011-y EDN QWQRZA
15. Шестаков А. В., Фрик П. Г. О статистических свойствах каскадных моделей турбулентности // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2024. № 4. С. 38–44. DOI: 10.17072/1994-3598-2024-4-38-44 EDN AEPEQO
16. Kuan C., Wang T. Investigation of the intermittent behavior of transitional boundary layer using a conditional averaging technique // *Experimental thermal fluid science*. 1990. Vol. 3. No. 2. P. 157–173.

© Кухарев А. Л., 2026

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В.,  
начальником патентного отдела ЮГМК Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 19.02.2026.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Кухарев Алексей Леонидович**, д-р техн. наук, доцент, профессор каф. автоматизированного управления и инновационных технологий  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

**Kukharev A. L.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: alex.kuharev@mail.ru)  
**ON INTERMITTENCY THE VELOCITY PULSATION IN ELECTRO-VORTEX MELT FLOWS**

The problem of analyzing the intermittency of velocity pulsations during electro-vortex melt flows in a hemispherical bath of installation with axisymmetric electrodes is considered. Various methods for processing the results of non-stationary modeling were used: discrete wavelet transform of time series, statistical methods for analyzing velocity increments, algorithm for separating turbulent and non-turbulent events in the velocity signal. Intermittency coefficients were calculated for various zones of the melt bath. It was shown that the highest level of intermittency occurs in the area where the jet impacts the bottom wall of the bath.

**Key words:** melt, electro-vortex flows, turbulence, discrete wavelet transform, intermittency.

## References

1. Kuberskii S. V., Podlipenskaya L. E., Krestin R. V., Shapka A. V. Development of the theory and technology of gas-dynamic refining and homogenization of liquid steel in a ladle [Razvitie teorii i tekhnologii gazodinamicheskogo rafinirovaniya i gomogenizatsii zhid-koj stali v kovshe]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. No. 10 (84). Pp. 45–54. EDN KIOXZG
2. Kuberskii S. V., Krestin R. V., Saratovskiy R. N., Servitovskiy Ya. Yu. Improvement of the physical model of pulsation melt mixing in steel-pouring ladle [Usovershenstvovanie fizicheskoy modeli pul'sacionnogo peremeshivaniya rasplava v sta-lerazlivochnom kovshe]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2023. No. 2 (76). Pp. 21–29. EDN KWLVRM
3. Kukharev A. L. Modeling of mixing processes in electro-vortex melt flows [Modelirovanie processov peremeshivaniya pri elektrovihrevykh techeniyah rasplava]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. No. 8 (82). Pp. 27–35. EDN JMUNFJ
4. Kukharev A. L. Statistical characteristics of velocity pulsations in electro-vortex melt flows [Statisticheskie harakteristiki pul'sacij skorosti pri elektrovihrevykh techeniyah rasplava]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. No. 9 (83). Pp. 39–48. EDN IVGZDO
5. Kukharev A. L. Frequency characteristics of velocity pulsations in electro-vortex melt flows [Chastotnye harakteristiki pul'sacij skorosti pri elektrovihrevykh techeniyah rasplava]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. No. 10 (84). Pp. 55–62. EDN KIQYMQ
6. Ivochkin Yu. P. Investigation of mechanisms of thermohydrodynamic and MHD processes with liquid-metal working bodies : thesis ... of Doctor in Techn. Sciences [Issledovanie mekhanizmov termogidrodinamicheskikh i MGD processov s zhidkometallicheskimimi rabochimi telami : dis. ... d-ra tekhn. nauk]. M. : n. p., 2015. 407 p.
7. Frik P. G. Turbulence: approaches and models [Turbulentnost': podhody i modeli]. Moscow — Izhevsk : Institute of Computer Science. 2003. 292 p. EDN TJOAIJ
8. Le T. H., Nguyen, D. A. Orthogonal-based wavelet analysis of wind turbulence and correlation between turbulence and forces. Vietnam Journal of Mechanics. Vol. 29. No. 2. Pp. 73–82.
9. Ivanov V. E., Ch'e E. U. Modular wavelet-filters: models, algorithms and means [Modul'nye vejvlet-fil'try: modeli, algoritmy i sredstva]. Khabarovsk : Izd-vo TOGU. 2020. 175 p. EDN VGDKVL
10. Frisch U. Turbulence. Legacy of Kolmogorov. Cambridge : Cambridge University Press. 1995. 296 p.
11. Veerasamy D., Atkin C. A rational method for determining intermittency in the transitional boundary layer. Experiments in Fluids. 2020. Vol. 61. No. 1. Art. 11.
12. Canepa E., Ubaldi M., Zunino P. Experiences in the application of intermittency detection techniques to hot-lm signals in transitional boundary layers. Proceeding of 16th symposium on measuring techniques in transonic and supersonic flow in cascades and turbomachines (Cambridge, 23–24 September 2002). Cambridge : Cambridge University Press, 2002. Pp. 2077–2085.
13. Fuchs A. [et al.]. An open source package to perform basic and advanced statistical analysis of turbulence data and other complex systems. Physics of fluids. 2022. Vol. 34. No. 10. Art. 101801. DOI: 10.1063/5.0107974 EDN JESHGY
14. Cornish C. R., Bretherton C. S., Percival D. B. Maximal overlap wavelet statistical analysis with application to atmospheric turbulence. Boundary-Layer Meteorology. 2006. Vol. 119. No. 2. Pp. 339–374. DOI: 10.1007/s10546-005-9011-y EDN QWQRZA
15. Shestakov A. V., Frik P. G. About the statistical properties of cascade turbulence models [O statisticheskikh svoystvakh kaskadnykh modelej turbulentnosti]. Bulletin of Perm University. Physics. 2024. No. 4. Pp. 38–44. DOI: 10.17072/1994-3598-2024-4-38-44 EDN AEPEQO
16. Kuan C, Wang T. Investigation of the intermittent behavior of transitional boundary layer using a conditional averaging technique. Experimental thermal fluid science. 1990. Vol. 3. No. 2. Pp. 157–173.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Kukharev Aleksey Leonidovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation Management and Innovation Technologies  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia, e-mail: alex.kuharev@mail.ru