ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА/THERMAL PHYSICS AND THERMOLOGY

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В ХОЛОДНОЙ МОДЕЛИ КОНИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ОПИЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Научная статья

Ершов М.И.[1, *], Никитин А.Д.[2], Нордин О.[3], Тупоногов В.Г.[4], Рыжков А.Ф.[5]
[1] ORCID : 0000-0001-9549-3044;
[2] ORCID : 0000-0002-1378-476X;
[4] ORCID : 0000-0003-3081-8383;
[5] ORCID : 0000-0002-0555-7196;
[1, 2, 3, 4, 5] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ershov1807ershov[at]yandex.ru)

Аннотация

В ходе работы исследована плоская холодная модель газогенератора, включающая входную область подачи воздуха, конический участок с углом раскрытия 38°, прямоугольную секцию 500×20 мм и выходную часть, соединённую с фильтром. Установка оснащена системой видеонаблюдения за дисперсным потоком и датчиками давления с цифровой записью для последующего статистического анализа. Эксперименты выполнены при различных фракциях опила (0,1…0,25 мм; 0,25…0,5 мм; 0,5…0,8 мм; 0,8…1,0 мм; 1,0…1,25 мм; 1,25…1,6 мм) и их смеси, с первоначальной высотой слоя 50 мм. Скорость воздуха на входе варьировалась от 0,4 до 5,4 м/с с длительностью каждого опыта 40 с. Результаты показали, что при низких скоростях (0,4…1,9 м/с) материал находится в режиме устойчивого фонтанирования с основными частотами пульсаций давления 3–5 Гц. Увеличение скорости приводит к переходу к нестабильной псевдоожиженности: диапазон колебаний расширяется до 0,5-8 Гц, а при ещё большем расходе воздуха слой переходит в разреженный режим с доминированием низких частот (около 2 Гц). Более мелкие фракции (0,1…0,8 мм) быстрее утрачивают стабильность, тогда как крупные частицы (0,8…1,6 мм) дольше сохраняют устойчивый режим. Спектральный анализ пульсаций давления на высотах 30 и 200 мм свидетельствует о заметном изменении среднеквадратического отклонения колебаний по высоте, причём верхний уровень сильнее реагирует на рост скорости. По данным распределения статического давления по высоте установлено, что объёмная концентрация частиц в зоне 30–50 мм над решёткой достигает 30%. При дальнейшем увеличении расхода воздуха наблюдается вымывание слоя вверх, формирование кластеров частиц в удалённых от входа в диффузор областях и значительное снижение объемной концентрации частиц. Полученные результаты позволяют прогнозировать динамическое поведение слоёв различной дисперсности и вносят вклад в разработку эффективных технологических процессов газификации.

Ключевые слова: фонтанирующий слой, пульсации давления, быстрое преобразование Фурье, среднеквадратическое отклонение.

EXPERIMENTAL STUDY OF HYDRODYNAMICS IN A COLD MODEL OF A CONICAL REACTOR FOR SAWDUST GASIFICATION USING RANDOM PROCESS THEORY

Research article

Ershov M.I.[1, *], Nikitin A.D.[2], Nordin O.[3], Tuponogov V.G.[4], Rizhkov A.F.[5]
[1] ORCID : 0000-0001-9549-3044;
[2] ORCID : 0000-0002-1378-476X;
[4] ORCID : 0000-0003-3081-8383;
[5] ORCID : 0000-0002-0555-7196;
[1, 2, 3, 4, 5] Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (ershov1807ershov[at]yandex.ru)

Abstract

During the work, a flat cold model of a gas generator was studied, including an air inlet area, a conical section with an opening angle of 38°, a rectangular section measuring 500×20 mm, and an outlet connected to a filter. The unit is equipped with a video surveillance system for dispersed flow and pressure sensors, with digital recording for subsequent statistical analysis. The experiments were carried out with different sawdust fractions (0.1–0.25 mm; 0.25–0.5 mm; 0.5–0.8 mm; 0.8–1.0 mm; 1.0–1.25 mm; 1.25–1.6 mm) and their mixtures, with an initial layer height of 50 mm. The air velocity at the inlet varied from 0.4 to 5.4 m/s, with each experiment lasting 40 seconds. The results showed that at low velocities (0.4–1.9 m/s), the material is in a stable flowing mode with main pressure pulsation frequencies of 3–5 Hz. An increase in speed leads to a transition to unstable pseudo-fluidisation: the fluctuations range expands to 0.5–8 Hz, and at even higher air flow rates, the layer transitions to a rarefied mode with a predominance of low frequencies (about 2 Hz). Smaller fractions (0.1–0.8 mm) lose stability more quickly, while larger particles (0.8–1.6 mm) remain stable for longer. Spectral analysis of pressure pulsations at heights of 30 and 200 mm shows a noticeable change in the root-mean-square deviation of fluctuations in height, with the upper level reacting more strongly to an increase in speed. According to the distribution of static pressure by height, it has been

established that the volume concentration of particles in the zone 30–50 mm above the grid reaches 30%. With a further increase in air flow, the layer is washed upward, particle clusters form in areas distant from the diffuser inlet, and the volumetric concentration of particles decreases significantly. The obtained results allow to predict the dynamic behaviour of beds of different dispersibility and contribute to the development of effective gasification processes.

Keywords: spouting bed, pressure pulsations, fast Fourier transform, root-mean-square deviation.

Введение

Для получения синтез-газа из древесного опила в реакционной камере газификатора необходимо создавать гидродинамические режимы течения двухфазной среды, обеспечивающие равномерное безагломерационное распределение твердых частиц по объему камеры [1, С. 18750-18756], [2, С. 101-104] и достаточное время пребывания в ней всего полидисперсного состава частиц.

Для контроля гидродинамического режима аппаратов с газодисперсными средами широко применяют амплитудно-частотные характеристики сигнала давления. Liu и соавторы [3, С. 78] показали, что в установках с фонтанирующим слоем с плотными частицами возможны различные доминирующие частоты фонтанирования (одна, две или несколько). Их появление зависит от соотношения скорости газа к минимальной скорости фонтанирования. При этом диапазон газовых скоростей, в котором сохраняется устойчивая работа, возрастает с увеличением плотности частиц. Анализ колебаний давления позволил разделить разные режимы на карте, включая переходные зоны с двойной или множественной доминирующей частотой. Gryczka и др. [4, С. 803-805] исследовали поведение нового фонтанирующего слоя с двумя регулируемыми газовыми входами, используя амплитудно-частотные характеристики. Для определения границ стабильного фонтанирования использовались быстрое преобразование Фурье и измерения полей скорости методом PIV. Переходы к режимам каналообразования или поршневания сопровождались возрастанием амплитуды сигнала и размыванием амплитудно-частотного спектра. Стабильное фонтанирование характеризовалось ровными частотными спектрами и согласованным циркулированием частиц без мёртвых зон. Salikov и соавторы [5, С. 722-728] в своей работе уделили особое внимание анализу амплитудно-частотных характеристик сигнала давления для определения устойчивости фонтанирующего слоя. Исследования показали, что при переходе к неустойчивым режимам фонтанирования, связанным с периодическим отклонением фонтана и поршневанием, в спектре сигнала давления появляются новые частоты, а общая энергия колебаний (амплитуда) возрастает. Авторы выявили, что изменение интенсивности пульсаций давления на разных уровнях слоя позволяет разделять устойчивое и переходное состояния, давая количественные критерии для определения границ режимов.

Распределение давления по высоте аппаратов с газодисперсными средами также, как и амплитудно-частотные важнейшим параметром, так как позволяет определять концентрацию твёрдой фазы и контролировать режим. Первичное деление полного перепада статического давления по высоте на гидростатику, ускорение частиц и трение было предложено [6, С. 62]. Маскаев и др. [7, С. 765] выявили, что при скоростях воздуха свыше 8–9 м/с величина трения и ускорения незначительна, и распределение давления отражает главным образом вес столба частиц. Это даёт возможность упрощённо определять плотность слоя, ориентируясь на «гидростатическую» часть. Fuchs и др. [8, С. 365-367], изучая верхнюю часть ЦКС, также пренебрегают ускорением, используя фактически постоянный профиль давления для оценки концентраций и уноса материала. Такой подход прост в реализации и даёт надёжные результаты при корректной геометрии выхода. Напротив, Schlichthaerle и Werther [9, С. 5490] показали, что в нижней зоне распределение давления может искажаться за счёт локального ускорения частиц, поэтому требуются коррекции к «гидростатическим» расчётам. Gungor [10, С. 451-455] учёл эти эффекты в численной модели, учитывающей все компоненты распределения давления, — это повысило точность предсказания концентраций. Wang и др. [11, С. 2443] при высоких температурах (до 550 °C) всё же сохраняют упрощённый подход, полагая, что изменения давления с высотой сравнительно невелики и вклад ускорения несущественен.

В работе представлены результаты экспериментов по псевдоожижению частиц опила в плоской лабораторной установке с трапецеидальной нижней частью с контролем пульсаций давления и измерением распределения статического давления по высоте.

Методы и принципы исследования

Экспериментальная система реализована в виде плоской холодной модели газогенератора, включающей нижнюю зону подачи воздуха, призматическую часть с углом раскрытия 38°, прямоугольный сегмент габаритами 500×20 мм и выходную секцию, направляющую газодисперсный поток к фильтру. На входе организовано сечение 50×20 мм. Для анализа поведения дисперсного слоя применялись видеосъемка и регистрация цифровых данных о пульсациях давления с последующей статистической обработкой. Амплитудно-частотные характеристики колебаний определяли с помощью датчика Keller PD-33X (частота опроса 32 Гц), установленного на высотах 30 и 200 мм над решеткой, которую условно можно считать входом в конический участок. Кроме того, распределение статического давления контролировали на высотных уровнях 30, 50, 100 и 150 мм, относительно уровня 1400 мм над решеткой (входом в призматический участок). Схематическое изображение лабораторной установки с указанием ключевых размеров и фотографией представлено на рисунке 1; стенки выполнены из полистирола.

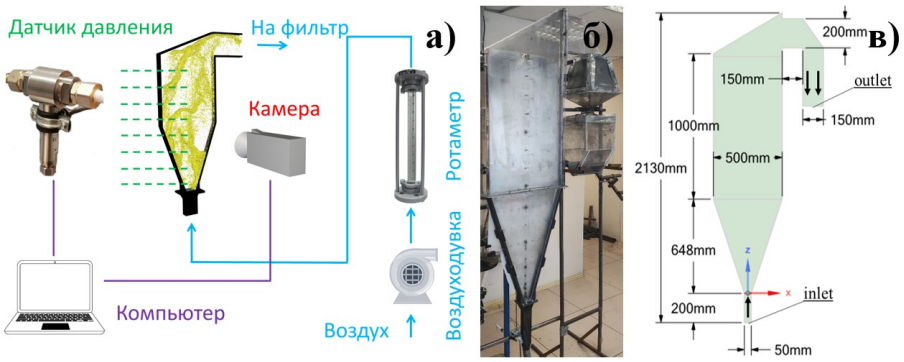

Рисунок 1 - Экспериментальный стенд:
а) схема; *б)* фотография установки; *в)* геометрическая модель с нанесенными размерами

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.1

В экспериментах использовали шесть фракций опилок (0,1…0,25 мм; 0,25…0,5 мм; 0,5…0,8 мм; 0,8…1,0 мм; 1,0…1,25 мм; 1,25…1,6 мм) и смесь с массовым составом: 9,82% (0,1…0,25 мм), 37,63% (0,25…0,5 мм), 28,60% (0,5…0,8 мм), 15,94% (0,8…1,0 мм), 4,74% (1,0…1,25 мм) и 3,27% (1,25…1,6 мм). Отдельные частицы длиной до 6 мм могли пройти через верхнее сито. Начальная высота слоя составляла 50 мм. Скорость воздуха во входном сечении (w_o) изменялась в интервале 0,4–5,4 м/с; при каждой скорости опыт длился 40 секунд. Плотность частиц в насыпном состоянии при встряхивании равнялась 147,6 кг/м^3, а при дополнительном уплотнении стержнем в мерном сосуде достигала 169,1 кг/м^3. В допущении объёмной концентрации твёрдой фазы равной 0,5, кажущаяся плотность частиц составляла 295,2–338,2 кг/м^3. Подобное разнообразие значений связано с высокой пористостью и шероховатостью опилок, возникающей вследствие структурных повреждений частиц. Изображения отдельных частиц фракции 1–1,25 мм под микроскопом приведены на рисунке 2.

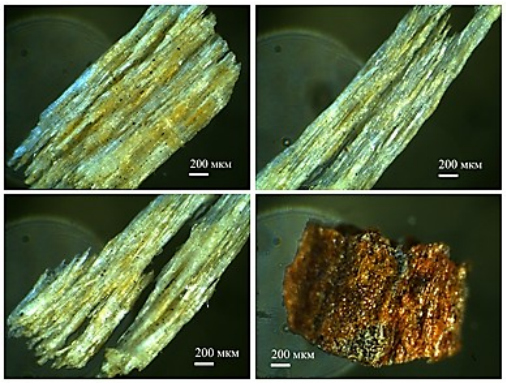

Рисунок 2 - Изображения отдельных частиц опила фракции 1-1,25 мм
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.2

Изучались среднеквадратическое отклонение и амплитудно-частотный спектр сигналов давления.
Среднеквадратическое отклонение, вычислялось по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{q=1}^{N}\left(y_q - y_m\right)^2} \quad (1)$$

где N — последний номер точки в исследуемом ряду данных, q — номер точки в ряду данных (q =1, 2, 3,…, N), y_q — точка ряда данных, y_m — среднее значение ряда данных:

$$y_m = \frac{1}{N}\sum_{q=1}^{N} y_q \quad (2)$$

Спектральный анализ функций пульсаций сигнала давления проводился с помощью дискретного преобразования Фурье, в котором каждая дискретная частота f_n вычисляется по формуле:

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t} \quad (3)$$

где N — число точек в исследуемом ряду данных, Δt — интервал времени между двумя последовательными точками в ряду данных, n — индекс, который обозначает номер дискретной частоты (n = 0, 1, 2,...., N−1), спектральный компонент Y_n для каждой частоты вычисляется по формуле:

$$Y_n = \sum_{q=0}^{N-1} y_q \exp\left(-j\frac{2\pi nq}{N}\right) \quad (4)$$

где q — номер точки в ряду данных (q = 0, 1, 2,…, N−1), y_q — точка ряда данных, j — мнимая единица, π — число Пи.

Рассматривалась первая половина спектра, соответствующая положительным частотам ($n \leq N/2$). Для получения амплитуды сигнала (A_w) спектральный компонент (4) был нормализован по формуле:

$$A_w = \frac{2}{N} Y_n \quad (5)$$

Для оконного преобразования Фурье спектральный компонент Y_n для каждой частоты вычисляется по формуле:

$$Y_n = \sum_{q=0}^{N-1} y_{qv} \exp\left(-j\frac{2\pi nq}{N}\right) \quad (6)$$

где q — номер точки в ряду данных (q = 0, 1, 2,…, N−1), j — мнимая единица, π — число Пи, y_{qw} — оконный сигнал, вычисляемый по формуле:

$$y_{qw} = y_q \cdot \theta_q \quad (7)$$

где y_q — точка ряда данных, θ_q — окно Ханна, вычисляемое по формуле:

$$\theta_q = 0.5\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi q}{N-1}\right)\right), \quad q = 0, 1, \ldots, N-1 \quad (8)$$

В оконном преобразовании Фурье уровень интенсивности каждой отдельной частоты выражается в виде её относительной спектральной плотности, выраженных в Децибелах ($10 \cdot \log_{10} S_y(f)$), на локальных участках сигнала по мере его изменения с течением времени, где S_y — спектральная плотность сигнала давления, Па^2·с:

$$S_y = \frac{1}{N}\left|\sum_{q=1}^{N} y_q \exp(2\pi f q)\right|^2 \quad (9)$$

где f — частота сигнала.

Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления

На рисунке 3 представлены данные по среднеквадратическому отклонению (СКО) пульсаций давления на двух высотных уровнях: 30 мм (рис. 3, а) и 200 мм (рис. 3, б). Для датчика, установленного ближе к решётке (30 мм), видно, что при низких и средних скоростях воздуха (0,4–3,1 м/с), соответствующих режимам устойчивого фонтанирования, СКО возрастает для большинства промежуточных фракций и их смеси. Однако при дальнейшем увеличении скорости (4,6 и 5,4 м/с), когда газодисперсная система переходит в нестабильное состояние и разреженный режим, величина СКО начинает снижаться.

В точке, расположенной на высоте 200 мм, картина принципиально иная: независимо от фракционного состава древесной стружки регистрируется почти монотонный рост СКО по мере ускорения воздушного потока. Кроме того, при сравнении фракций с их смесью выявлен интересный эффект подобия: в нижней точке параметры смеси в большинстве случаев повторяют тенденцию фракции 0,5…0,8 мм; в верхней же точке при скоростях от 0,4 до 3,1 м/с кривая для смеси близка к характеристикам фракции 0,25…0,5 мм, а при дальнейших увеличениях скорости (4,6–5,4 м/с) совпадает с фракцией 0,5…0,8 мм. Такая динамика указывает на сложные механизмы взаимовлияния частиц при движении потока вверх и подтверждает важность фракционного состава при выборе оптимальных режимов газификации.

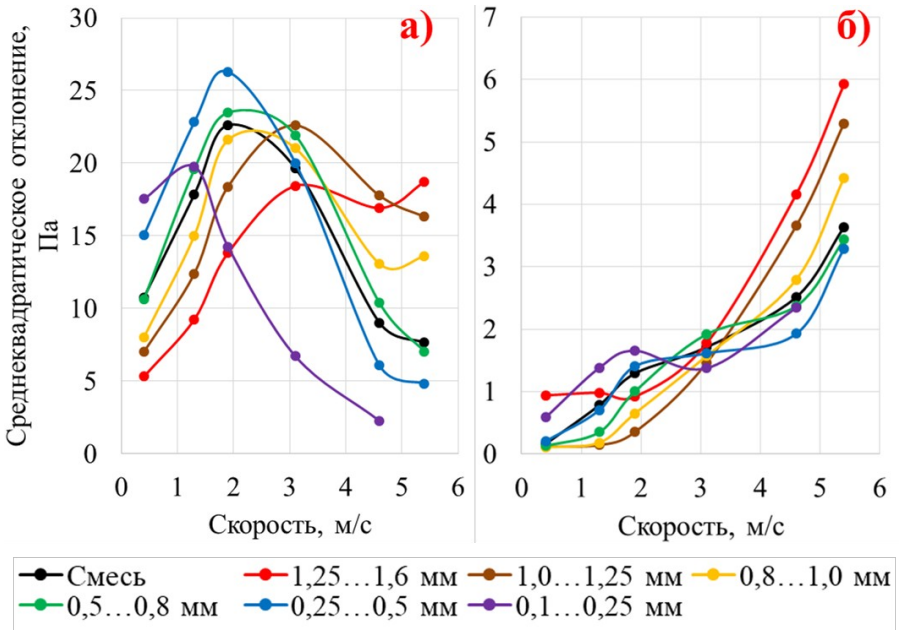

Рисунок 3 - Среднеквадратическое отклонение пульсаций давления при различных составах для точки замера на высоте над входным сечением:
а) 30 мм; *б)* 200 мм
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.3

На рисунке 4 приведены результаты оконного преобразования Фурье с длительностью окна 8 секунд, полученные для двух сигналов пульсаций давления (а — датчик у нижнего сечения, б — датчик на верхнем уровне). По вертикали отложены частоты до 16 Гц, а по горизонтали — время эксперимента с разбиением по скоростям воздуха. Нормированная цветовая шкала отражает интенсивность спектральных компонентов относительно максимальной амплитуды в пределах каждого временного окна, что позволяет наглядно выявлять доминирующие режимы колебаний и отслеживать их эволюцию с изменением скорости потока.

Для датчика, расположенного у нижней границы слоя (рис. 4, а), пунктирной линией на уровне 4,46 Гц обозначена основная частота гравитационных колебаний пузырькового слоя, высота которого составляет 50 мм; расчёт выполнен по формуле [12, С. 115]:

$$f = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{g}{h_b}} \tag{10}$$

где f − частота колебаний, g − ускорение свободного падения, h_b − высота слоя.

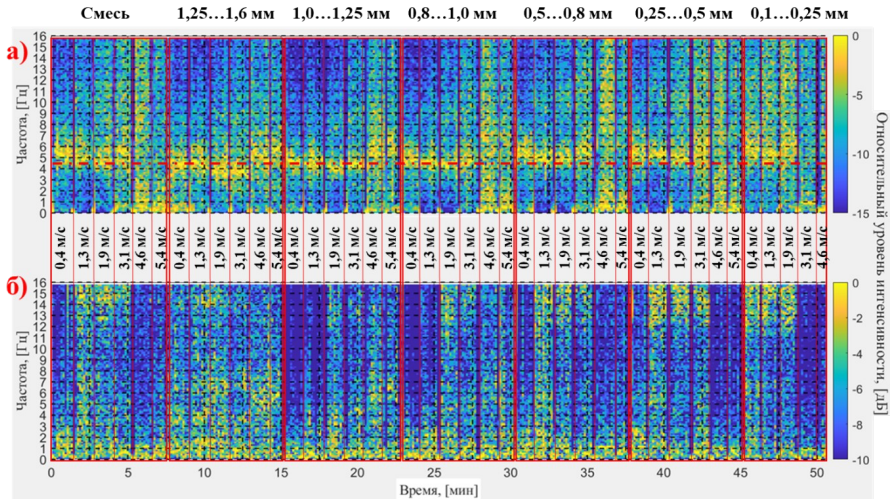

Рисунок 4 - Оконное преобразование Фурье для разверток пульсаций давления при различных дисперсных составах и скоростях на входе в установку для точки замера на высоте над входным сечением:
а) 30 мм; *б)* 200 мм
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.4

Результаты спектрального анализа показали, что с уменьшением размера фракции частота колебаний внизу слоя при стабильном фонтанировании (1,3 м/с) возрастает от 4 до 5,5 Гц, а также провоцируется более быстрое наступление нестабильного (множество нестационарных доминантных частот) и разреженного режимов (частоты 0-2 Гц). Наиболее близки к формуле (10) фракции 0,8…1,6 мм. На высоте 200 мм наиболее часто доминантные частоты лежат в диапазоне 0–2 Гц, но для крупных фракций (0,8…1,6 мм) также отмечаются доминантные частоты в районе 3-7 Гц, когерентные тем, что имеют место внизу слоя в случае нестабильного фонтанирования, а для более мелких фракций характерно существование доминантных частот 12–16 Гц.

На рисунке 5 показаны спектрограммы пульсаций давления для четырех наиболее схожих в плане наборов гидродинамических режимов (стабильное фонтанирование — нестабильное фонтанирование — разреженный режим) фракций опила для шести скоростей. Из результатов видно, что чем крупнее опил, тем меньше доминирующая частота при стабильном фонтанировании (скорости 0,4–1,9 м/с), а также тем на более высоких скоростях достигается нестабильный режим фонтанирования (нестационарная смена доминирующей частоты в диапазоне 0,5–8 Гц) и впоследствии разреженный режим (доминирующая частота в диапазоне 0–1 Гц).

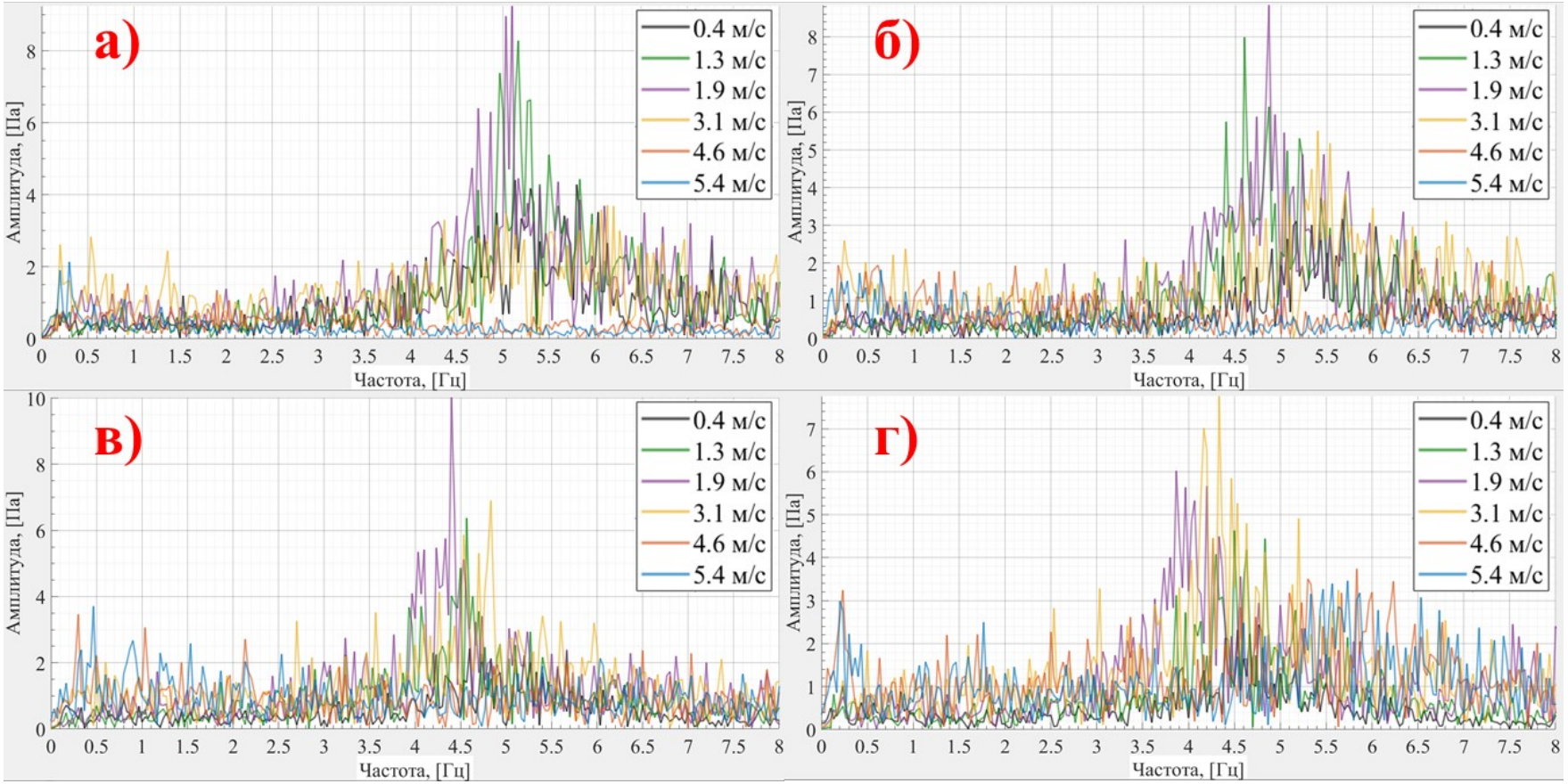

Рисунок 5 - Спектрограммы пульсаций давления в точке на высоте 30 мм над решеткой для различных скоростей воздуха на входное сечение и фракционных составов опила при начальной высоте засыпки 50 мм:
а) фракция 0,25-0,5 мм; *б)* фракция 0,5-0,8 мм; *в)* фракция 0,8-1,0 мм; *г)* фракция 1,0-1,25 мм

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.5

Распределение давлений и концентраций по высоте

Также были построены распределения статических давлений по высоте для пустой установки («Чистый поток») и для смеси фракций («Загруженный поток») при высоте засыпки 50 мм, на основании которых была произведена оценка объемной концентрации частиц по высоте установки для скоростей воздуха на входе в диффузор w_o = 0,4; 1,3; 1,9; 3,1 и 4,6 м/с. При оценке объемной концентрации плотность опила принималась равной 300 кг/м^3. Оценка проводилась на основании формулы [6, С. 62]:

$$\varphi = \frac{1}{\rho_s \cdot g} \frac{\Delta p}{\Delta h} \tag{11}$$

где ρ_S — плотность частиц, g — ускорение свободного падения, Δp — разница давлений между двумя высотами, Δh — расстояние между высотными отметками. Разница давлений между двумя высотами бралась из распределения давления, измеренного напрямую при наличии частиц опила («Загруженный поток») и из распределения разницы давлений загруженного и чистого потока («Вычитание чистого потока»).

На рисунках 6, 7 и 8 для скоростей на входе w_o = 0,4; 1,3; 1,9 м/с, соответственно, приводятся распределение избыточного давления по высоте относительно точки 1,4 м для загруженного опилом и чистого потока воздуха наряду с разницей между ними, а также распределение объемных концентраций по высоте. Из рисунков 6–8 видно, что для подобных высококонцентрированных состояний стабильно фонтанирующего слоя опила поправка распределения давления на свободный поток слабо влияет на объемные концентрации. На высотном уровне 30–50 мм свойственны объемные концентрации опила в диапазоне 27–33%, которые слабо коррелируют со скоростью воздуха на входе. При этом на высотном уровне 50–100 мм с ростом скорости объемная концентрация стабильно снижается, составляя 10,5%, 7,4% и 4,2% для скоростей на входе w_o = 0,4; 1,3; 1,9 м/с, соответственно. На высотном уровне 100-150 мм, наоборот с ростом скорости объемная концентрация стабильно повышается, составляя 0,29%, 0,76% и 1,69% для скоростей на входе w_o = 0,4; 1,3; 1,9 м/с, соответственно.

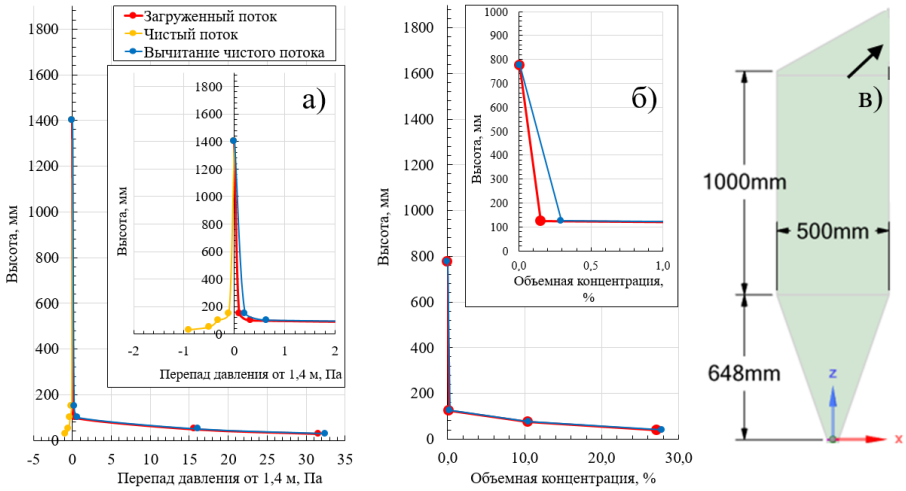

Рисунок 6 - Распределение избыточного давления относительно точки 1,4 м по высоте *(а)*, оценка объёмных концентраций *(б)* и профиль установки *(в)* для скорости w_o = 0,4 м/с

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.6

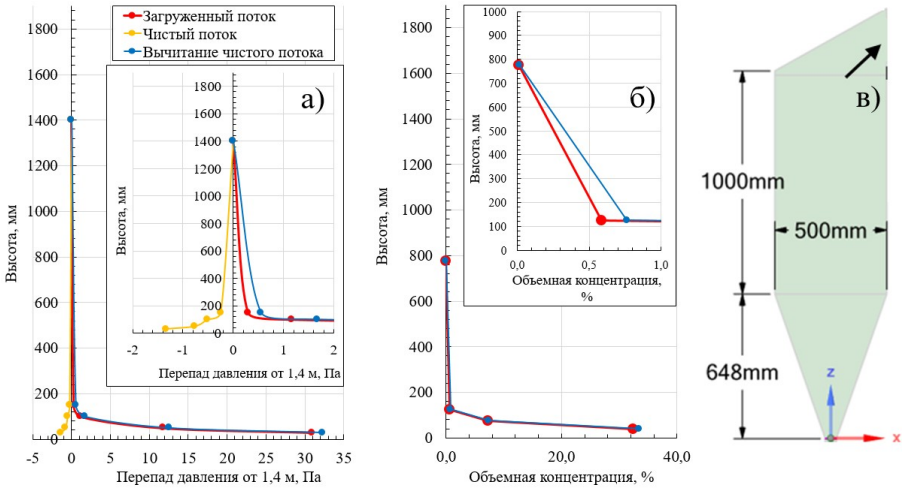

Рисунок 7 - Распределение избыточного давления относительно точки 1,4 м по высоте *(а)*, оценка объёмных концентраций *(б)* и профиль установки *(в)* для скорости w_o = 1,3 м/с
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.7

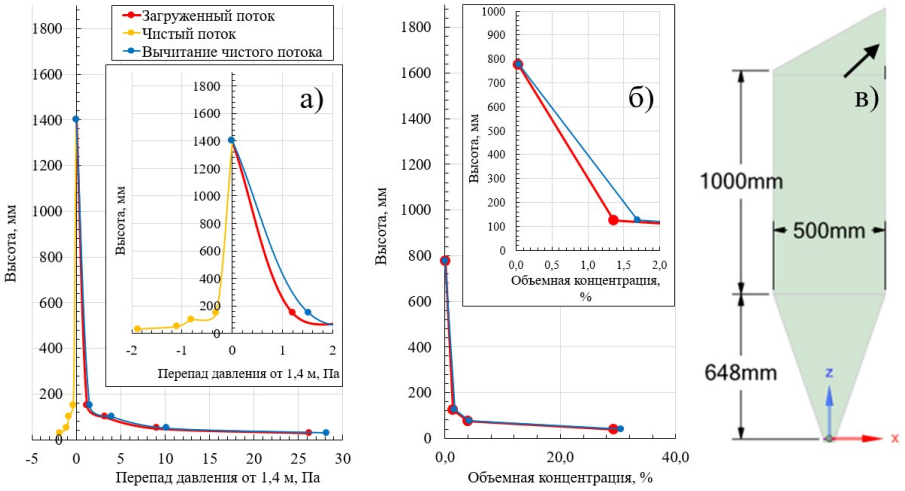

Рисунок 8 - Распределение избыточного давления относительно точки 1,4 м по высоте *(а)*, оценка объёмных концентраций *(б)* и профиль установки *(в)* для скорости w_o = 1,9 м/с
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.8

На рисунке 9 показаны фотографии фонтанирующего слоя опила для скоростей w_o = 0,4; 1,3; 1,9 м/с. Оценки объемных концентраций на высотных уровнях 30-50 и 50-100 мм выглядят реалистичными, поскольку в данной области отчетливо видно основание ядра фонтанирующего слоя, граничащее с периферийной зоной. На высотном уровне 100-150 мм, тем не менее, предсказанные объемные концентрации 0,29-1,69% кажутся сильно заниженными ввиду наличия практически тех же самых кластеров частиц, что и на уровне 50-100 мм. Это может быть обусловлено тем, что струя с опилом на данном высотном уровне входит в свободное пространство и более не стеснена периферийной зоной частиц.

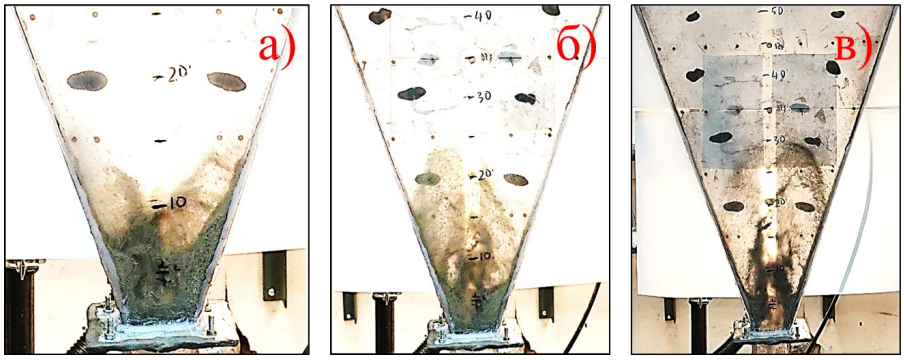

Рисунок 9 - Фотографии фонтанирующего слоя опила для скоростей w_o = 0,4 *(а)*; 1,3 *(б)*; 1,9 *(в)* м/с
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.9

На рисунках 10 и 11 для скоростей на входе w_o = 3,1; 4,6 м/с, соответственно, приводятся распределение избыточного давления по высоте относительно точки 1,4 м для загруженного опилом и чистого потока воздуха наряду с разницей между ними, а также распределение объемных концентраций по высоте. Из рисунков 10-11 видно, что для подобных форсированных состояний с большим разбросом частиц опила поправка распределения давления на свободный поток влияет на объемные концентрации значительно сильнее, чем в предыдущих случаях. На высотном уровне 30-50 мм свойственны объемные концентрации опила примерно 21%, которые слабо коррелируют со скоростью воздуха на входе. При этом на высотном уровне 50-100 мм с ростом скорости объемная концентрация сильно снижается, составляя 3,6% и 1,9% для скоростей на входе w_o = 3,1; 4,6 м/с, соответственно. На высотном уровне 100-150 мм, наоборот с ростом скорости объемная концентрация стабильно повышается, составляя 1,71% и 3,23% для скоростей на входе w_o = 3,1; 4,6 м/с, соответственно. Также для скорости на входе w_o = 4,6 м/с наблюдается немонотонность профиля объёмной концентрации, построенного по распределению давления по высоте с учетом вычитания распределения давления по высоте чистого потока.

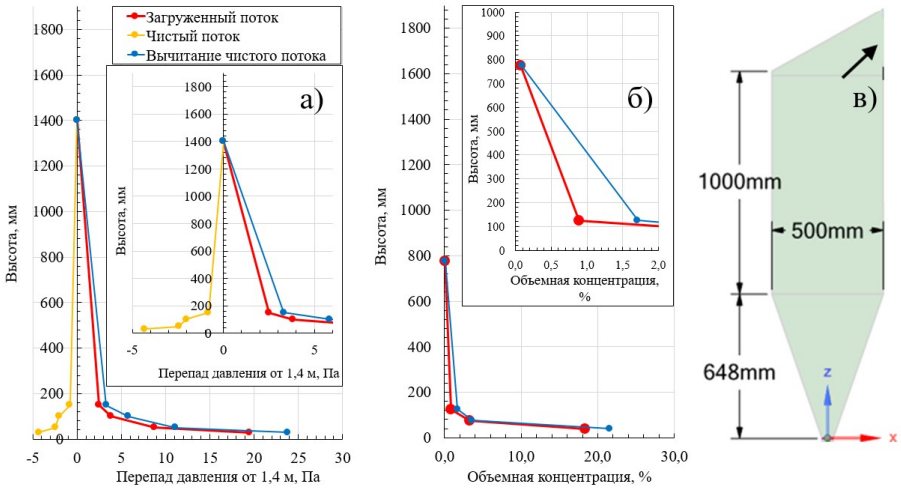

Рисунок 10 - Распределение избыточного давления относительно точки 1,4 м по высоте *(а)*, оценка объёмных концентраций *(б)* и профиль установки *(в)* для скорости w_o = 3,1 м/с
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.10

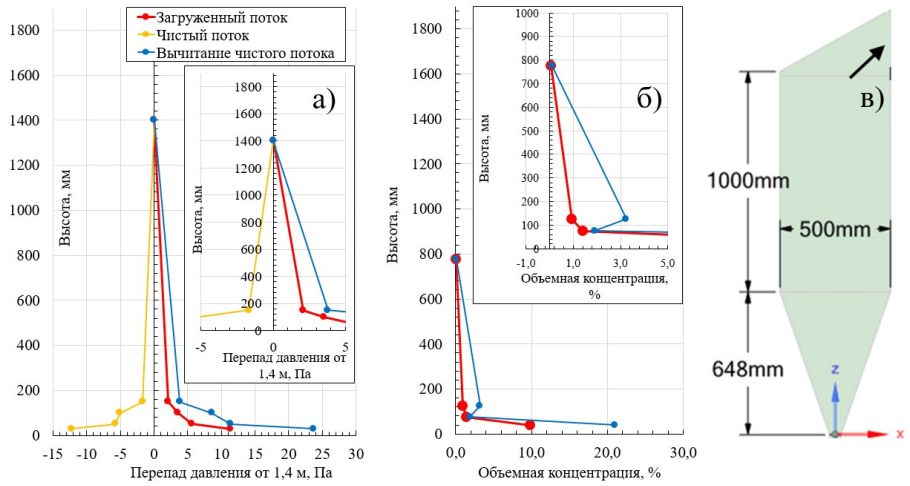

Рисунок 11 - Распределение избыточного давления относительно точки 1,4 м по высоте *(а)*, оценка объёмных концентраций *(б)* и профиль установки *(в)* для скорости w_o = 4,6 м/с
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.11

На рисунке 12 показаны фотографии фонтанирующего слоя опила для скоростей w_o = 3,1; 4,6 м/с. Оценка объемной концентрации на высотном уровне 30-50 мм (21%) выглядит реалистичной, поскольку в данной области отчетливо видно основание ядра фонтанирующего слоя, граничащее с периферийной зоной. На высотных уровнях 50-100 и 100-150 мм, тем не менее, предсказанные объемные концентрации 1-4% кажутся сильно заниженными ввиду наличия значительных кластеров частиц на данных уровнях. Помимо истечения струи с опилом в свободное пространство это может быть обусловлено сильным отклонением струи в данных форсированных нестабильных режимах.

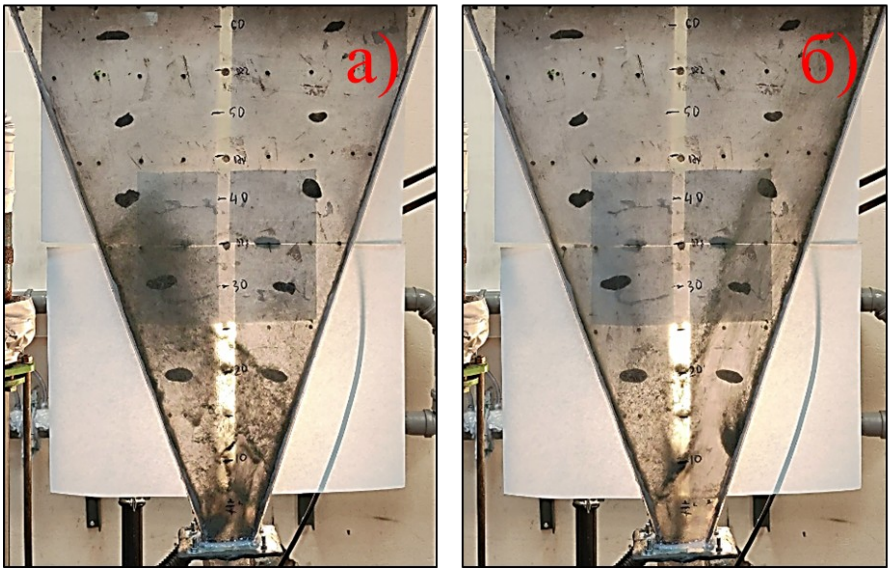

Рисунок 12 - Фотографии фонтанирующего слоя опила для скоростей w_o = 3,1 *(а)*; 4,6 *(б)* м/с
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.30.12

Заключение

Выполнено экспериментальное и численное исследование фонтанирующего слоя частиц опила в плоской холодной модели газогенератора. Для шести фракционных групп (от 0,1…0,25 мм до 1,25…1,6 мм) и смеси фракций проведён анализ пульсаций давления, получены распределения статического давления по высоте, рассчитана объёмная концентрация частиц. Показано существование трёх основных режимов псевдоожижения: стабильное фонтанирование с характерными частотами 3–5 Гц, нестабильное (0,5–8 Гц) и разреженное (до 2 Гц). Установлено, что максимальная концентрация частиц (свыше 30%) наблюдается в нижних слоях, при этом повышение скорости газа приводит к размыванию слоя и увеличению зоны рециркуляции.

Полученные результаты позволяют более точно управлять процессами газификации биомассы и совершенствовать конструктивные решения промышленных установок с учётом формы и размеров частиц опила.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030». Название проекта: Разработка научно-технологических основ получения синтез-газа из биомассы в несущем потоке с использованием экспериментальных методов, математического моделирования и опытно-промышленных испытаний.

Funding

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Development Program of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin in accordance with the program of strategic academic leadership "Priority 2030". Project title: Development of scientific and technological foundations for the production of synthesis gas from biomass in a carrier stream using experimental methods, mathematical modeling and pilot tests.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Nascimento F.R.M. Bench-scale bubbling fluidized bed systems around the world – bed agglomeration and collapse: a comprehensive review / F.R.M. Nascimento, A.M. González, E.E.S. Lora // International Journal of Hydrogen Energy. — 2021. — 36. — P. 18740–18766. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.086
2. Göktep B. Does distance among biomass particles affect soot formation in an entrained flow gasification process? / B. Göktep, K. Umeki, R. Gebart // Fuel Processing Technology. — 2016. — 141. — P. 99–105. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.08.036
3. Liu M. Investigation of fluidization behavior of high-density particle in spouted bed using CFD–DEM coupling method / M. Liu, Y. Wen, R. Liu // Powder Technology. — 2015. — 280. — P. 72–82.
4. Gryczka O. Characterization of the pneumatic behaviour of a novel spouted-bed apparatus with two adjustable gas inlets / O. Gryczka, S. Heinrich, V. Miteva // Chemical Engineering Science. — 2008. — 63. — P. 791–814.
5. Salikov V. Investigations on the spouting stability in a prismatic spouted bed and apparatus optimization / V. Salikov, S. Heinrich, S. Antonyuk // Advanced Powder Technology. — 2015. — 3. — P. 718–733.
6. Pugsley T. A predictive hydrodynamic model for circulating fluidized-bed risers / T. Pugsley, F. Berruti // Powder Technology. — 1996. — 1. — P. 57–69. — DOI: 10.1016/s0032-5910(96)03154-3
7. Маскаев В.К. Аэродинамика циркулирующего псевдоожиженного слоя / В.К. Маскаев, А.П. Баскаков, У.Г. Усольцев и др. // Инженерно-физический журнал. — 1989. — 5. — С. 762–767.
8. Fuchs J. A general method for the determination of the entrainment in fluidized beds / J. Fuchs, J. Schmid, F. Benedikt // The International Journal of Multiphysics. — 2018. — 12. — P. 359–371.
9. Schlichthaerle P. Axial pressure profiles and solids-concentration distributions in the CFB bottom zone / P. Schlichthaerle, J. Werther // Chemical Engineering Science. — 1999. — 22. — P. 5485–5493.
10. Gungor A. Predicting axial pressure profile of a CFB / A. Gungor // Chemical Engineering Journal. — 2008. — 140. — P. 448–456.
11. Wang X.S. Influence of temperature on solids-flux distribution in a CFB riser / X.S. Wang, M. Rhodes, B.M. Gibbs // Chemical Engineering Science. — 1995. — 50. — P. 2441–2447.
12. Baskakov A.P. A study of pressure fluctuations in a bubbling fluidized bed / A.P. Baskakov, V.G. Tuponogov, N.F. Philippovsky // Powder Technology. — 1986. — 2. — P. 113–117.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Nascimento F.R.M. Bench-scale bubbling fluidized bed systems around the world – bed agglomeration and collapse: a comprehensive review / F.R.M. Nascimento, A.M. González, E.E.S. Lora // International Journal of Hydrogen Energy. — 2021. — 36. — P. 18740–18766. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.086
2. Göktep B. Does distance among biomass particles affect soot formation in an entrained flow gasification process? / B. Göktep, K. Umeki, R. Gebart // Fuel Processing Technology. — 2016. — 141. — P. 99–105. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.08.036
3. Liu M. Investigation of fluidization behavior of high-density particle in spouted bed using CFD–DEM coupling method / M. Liu, Y. Wen, R. Liu // Powder Technology. — 2015. — 280. — P. 72–82.
4. Gryczka O. Characterization of the pneumatic behaviour of a novel spouted-bed apparatus with two adjustable gas inlets / O. Gryczka, S. Heinrich, V. Miteva // Chemical Engineering Science. — 2008. — 63. — P. 791–814.
5. Salikov V. Investigations on the spouting stability in a prismatic spouted bed and apparatus optimization / V. Salikov, S. Heinrich, S. Antonyuk // Advanced Powder Technology. — 2015. — 3. — P. 718–733.
6. Pugsley T. A predictive hydrodynamic model for circulating fluidized-bed risers / T. Pugsley, F. Berruti // Powder Technology. — 1996. — 1. — P. 57–69. — DOI: 10.1016/s0032-5910(96)03154-3

7. Maskaev V.K. Ae'rodinamika cirkuliruyushhego psevdoozhizhennogo sloya [Aerodynamics of the circulating fluidized bed] / V.K. Maskaev, A.P. Baskakov, U.G. Usol'cev et al. // Engineering Physics Journal. — 1989. — 5. — P. 762–767. [in Russian]

8. Fuchs J. A general method for the determination of the entrainment in fluidized beds / J. Fuchs, J. Schmid, F. Benedikt // The International Journal of Multiphysics. — 2018. — 12. — P. 359–371.

9. Schlichthaerle P. Axial pressure profiles and solids-concentration distributions in the CFB bottom zone / P. Schlichthaerle, J. Werther // Chemical Engineering Science. — 1999. — 22. — P. 5485–5493.

10. Gungor A. Predicting axial pressure profile of a CFB / A. Gungor // Chemical Engineering Journal. — 2008. — 140. — P. 448–456.

11. Wang X.S. Influence of temperature on solids-flux distribution in a CFB riser / X.S. Wang, M. Rhodes, B.M. Gibbs // Chemical Engineering Science. — 1995. — 50. — P. 2441–2447.

12. Baskakov A.P. A study of pressure fluctuations in a bubbling fluidized bed / A.P. Baskakov, V.G. Tuponogov, N.F. Philippovsky // Powder Technology. — 1986. — 2. — P. 113–117.