

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 532.529
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-307-317>

Поступила в редакцию 18.01.2018
Received 18.01.2018

Е. А. Пицуха, Э. К. Бучилко, Ю. С. Теплицкий

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ЦИКЛОННО-СЛОЕВОЙ КАМЕРЕ**

Аннотация. Выполнено экспериментальное исследование радиальных распределений тангенциальной и продольной скоростей воздуха, а также полного и статического давления в вихревой зоне циклонно-слоевой камеры диаметром 0,21 м. Эксперименты проведены при различных режимных (доля донного дутья, общий объемный расход воздуха) и геометрических (диаметр и форма выходного отверстия) параметрах камеры, а также при наличии неподвижного или кипящего слоя зернистого материала. Проведено исследование влияния неизотермичности донного и тангенциального дутья на характер распределения скоростей и давления в вихревой зоне циклонно-слоевой камеры. Установлено влияние температуры донного дутья на продольную скорость воздуха в центральной части вихревой зоны камеры. Показано, что размер диаметра выходного отверстия существенно влияет на величину давления в камере. Продольная скорость в центральной части камеры практически не зависит от формы выходного отверстия. Установлено, что наличие кипящего слоя оказывает влияние на аэродинамику вихревой зоны циклонно-слоевой камеры. В присутствии кипящего слоя имеет место нарушение автомодельности распределения безразмерных аэродинамических характеристик вихревой зоны. Полученные экспериментальные данные обобщены в рамках теории подобия с использованием безразмерной величины, характеризующей аэродинамику неоднородного кипящего слоя, – числа Фруда (Fr). Использование Fr позволяет исследовать влияние аэродинамики кипящего слоя на особенность распределения скорости воздуха и давления в вихревой зоне, а также учитывает влияние такого важного фактора, как доля донного дутья.

Ключевые слова: неподвижный слой, кипящий слой, циклонно-слоевая камера, вихревая зона, автомодельность, тангенциальная скорость, продольная скорость, полное давление, живое сечение сопел, температура

Для цитирования: Пицуха, Е. А. О закономерностях вихревых течений в циклонно-слоевой камере / Е. А. Пицуха, Э. К. Бучилко, Ю. С. Теплицкий // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 307–317. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-307-317>

E. A. Pitsukha, E. K. Buchilko, Yu. S. Teplitskii

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

INVESTIGATION OF THE REGULARITIES OF VORTICAL FLOWS IN A CYCLONE-BED CHAMBER

Abstract. Experimental investigation of the radial distributions of tangential and longitudinal velocities, total and static pressures in the vortex zone of a cyclone-bed chamber of diameter 0.21 m has been carried out. The experiments were carried out at various regime parameters (fraction of bottom blast, total air volume flow) and geometric parameters (diameter and shape of the outlet) of the chamber, and also in the presence of a fixed or fluidized bed of granular material. The influence of nonisotherm of bottom and tangential blast on the distribution pattern of velocity and pressure in the vortex zone of the cyclone-bed chamber is investigated. There was determined the influence of bottom blast temperature on the longitudinal velocity of air in the central part of the vortex zone chamber. It is shown that the diameter of the outlet has a significant effect on the pressure in the chamber. The longitudinal velocity in the central part of the chamber is practically independent of the shape of the outlet. The presence of the fluidized bed has an effect on the hydrodynamics of the cyclone-bed chamber vortex zone. In the presence of the fluidized bed there has been a violation of the self-similarity of hydrodynamic dimensionless

parameters distribution in the vortex zone. The obtained experimental data were summarized within the framework of the similarity theory with the use of a dimensionless quantity characterizing the hydrodynamics of an inhomogeneous fluidized bed – the Froude number (Fr). The use of the Froude number makes it possible to take into account the effect of the fluidized bed hydrodynamics on the features of air velocity and pressure distributions in the vortex zone, and also takes into account the influence of such an important factor as the fraction of bottom blast.

Keywords: fixed bed, fluidized bed, vortex-bed chamber, vortical zone, self-similarity, tangential velocity, longitudinal velocity, total pressure, flow section of nozzles, temperature

For citation. Pitsukha E. A., Buchilko E. K., Teplitskii Yu. S. Investigation of the regularities of vortical flows in a cyclone-bed chamber. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 307–317 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-307-317>

Введение. Неподвижные и кипящие зернистые слои с вихревой организацией надслоевого пространства являются перспективными для сжигания твердых биотоплив по двухстадийной технологии [1]. Аэродинамика вихревой зоны, где в основном завершается горение топлива, оказывает большое влияние на эффективность всего процесса, поэтому ее детальное изучение имеет большое практическое значение. Исследованию параметров закрученного потока в циклонных камерах в отсутствие зернистого слоя посвящено значительное количество работ [2–6]. Как правило, в опытах использовались тангенциальные сопла с большим живым сечением $\alpha = 0,015 \div 0,05$. Было установлено наличие двух характерных зон вращения потока: центральная зона квазитвердого вращения и периферийная зона потенциального вращения. Показано, что такая структура хорошо описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} = 0. \quad (1)$$

В [7] были исследованы закрученные течения в циклонных камерах с соплами малого живого сечения $\alpha = 0,00138 - 0,0075$. Показано, что в этих условиях профили тангенциальной скорости существенно меняются. Для камер с относительным диаметром выхлопного отверстия (пережима) $d_{\text{out}}/D > 0,4 \div 0,5$ наблюдалась лишь одна зона, близкая по характеру к квазитвердому вращению. Характерный для камер с большим α максимум функции $V_\varphi(r)$ отсутствовал. Исследования циклонно-слоевых камер с малым живым сечением тангенциальных сопел для условий работы циклонно-слоевых топок не проводились. В [8] изучение аэродинамики вихревой камеры в присутствии кипящего слоя были выполнены при $\alpha = 0,024$. Показано, что формируемый газовыми пузырями унос частиц из слоя оказывает существенное влияние на аэродинамику всей вихревой зоны, приводя к существенной деформации профиля $V_\varphi(r)$: пропадает пристенная зона потенциального вращения и появляется дополнительный максимум фракции $V_\varphi(r)$.

Целью данной работы явилось исследование особенностей распределения скоростей воздуха и полного давления в вихревой зоне циклонно-слоевой камеры с малым живым сечением тангенциальных сопел при наличии неподвижного или кипящего слоя в изотермических и в неизо-термических условиях.

Экспериментальное исследование. Изучение полей скоростей и давления воздуха проводилось в циклонно-слоевой камере сгорания макетного топочно-го устройства мощностью до 100 кВт. Схема циклонно-слоевой камеры приведена на рис. 1.

В нижней части камеры диаметром $D_b = 180$ мм на пористой газораспределительной решетке (1) находился слой зернистого материала (2) (перловая крупа, керамзит, кварцевый песок), проду-

Характеристики зернистых материалов Characteristics of granular materials

Материал	d , м	ρ_s , кг/м ³	u_{mp} , м/с	Форма
Кварцевый песок	$0,24 \cdot 10^{-3}$	2600	0,049	Округлая
Кварцевый песок	$0,425 \cdot 10^{-3}$	2600	0,0133	Округлая
Перловая крупа	$3 \cdot 10^{-3}$	1200	0,8	Продолговатая
Керамзит	$10 \dots 20 \cdot 10^{-3}$	550	1,53	Округлая

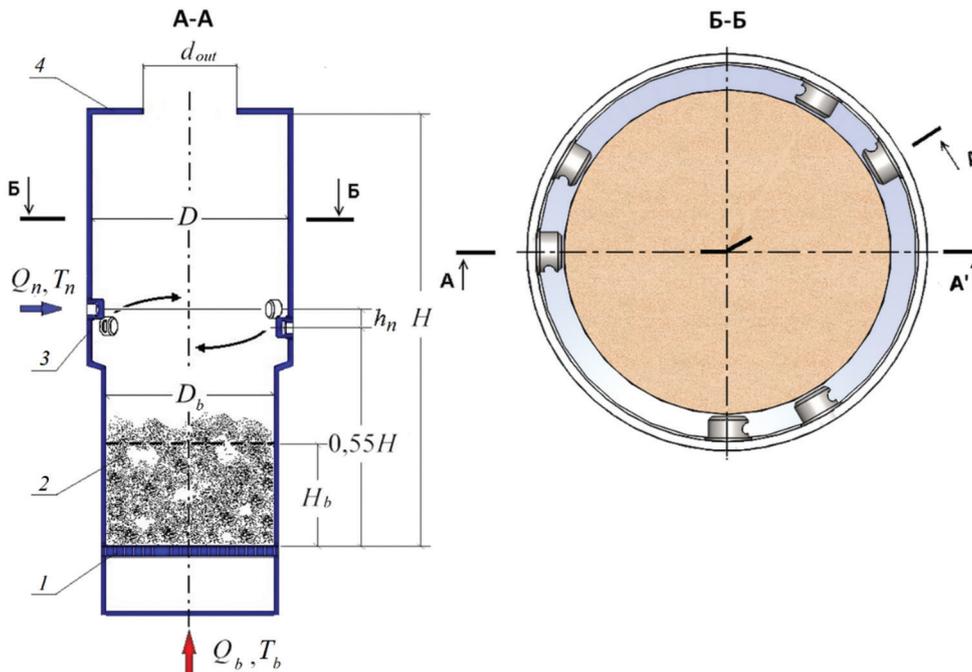


Рис. 1. Схема циклонно-слоевой камеры: 1 – газораспределительная решетка, 2 – кипящий слой, 3 – сопла ввода тангенциального дутья, 4 – пережим

Fig. 1. Scheme of the cyclone-bed chamber: 1 – gas distribution grid, 2 – fluidized bed, 3 – nozzles of tangential blast, 4 – pinch

ваемый донным воздухом. Характеристики зернистых материалов приведены в таблице. Высота слоя в неподвижном состоянии составляла $H_b = 110$ мм.

Выше слоя в камере диаметром $D = 210$ мм для ввода тангенциального воздуха в два ряда располагалось шесть цилиндрических сопел (3) (по три сопла в каждом ряду). Расстояние между рядами $h_n = 20$ мм. Общее выходное сечение сопел $f_{in} = 0,00053$ м², живое сечение $\alpha = 0,00245$. Общая высота камеры составляла $H = 458$ мм, высота надслоевого пространства при неподвижном слое $H - H_b = 348$ мм.

В верхней части камеры имелась съемная крышка (4), в центре которой находилось круглое отверстие для отвода воздуха (пережим). Относительный диаметр выходного отверстия $d_{out}/D = 0,4; 0,5; 0,7$. Режимные параметры в экспериментах были следующие: объемный расход $Q_{\Sigma} = 40, 60$ м³/ч; доля донного дутья $\varphi = 0,35; 0,50; 0,65$. С целью исследования влияния формы выходного отверстия на поле скоростей и давлений был проведен ряд экспериментов с пережимом, схема которого приведена на рис. 2. Суммарная площадь трех выходных отверстий равнялась площади отверстия в пережиме $d_{out}/D = 0,5$.

Измерения выполнялись в радиальной плоскости А–А' в сечении на расстоянии от газораспределительной решетки, равном $0,72H$. Методика экспериментального исследования описана в [1]. Измерения проводились с помощью одноканального пневматического зонда диаметром 4,8 мм.

В экспериментах были реализованы режимы как с кипением слоя зернистого материала (опыты с кварцевым песком), так и со стационарным плотным слоем (опыты с перловой крупой и керамзитом). При проведении экспериментов температура воздуха составляла 30 °С.

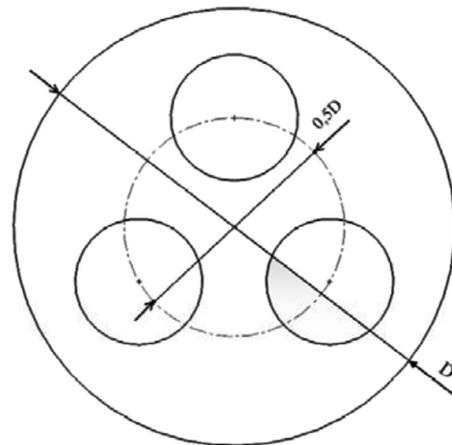


Рис. 2. Схема пережима с тремя выходными отверстиями
Fig. 2. Scheme of the pinch with three outlets

В экспериментах с неизотермичностью донного и тангенциального дутья донный воздух подогревался до температуры $t_b \cong 200, 400$ °С.

Результаты экспериментального исследования.

Распределение скоростей и давления воздуха в вихревой зоне в неизотермических условиях. На рис. 3–6 показаны радиальные распределения безразмерных V_φ' , V_z' и P' при изотермическом (рис. 3) и неизотермических течениях (рис. 4–6) (различные температуры донного дутья).

Как видно из рис. 3–5, распределения V_φ' не имеют максимума, характерного для камер с большими α . Только при $T_b = 400$ °С (рис. 6) появляется локальный максимум при $\varphi = 0,5$. Особенностью распределения V_z' является существенное возрастание с ростом T_b в центральной части камеры (рис. 4–6). Пристенные величины V_φ' и P' существенно меньше, чем в случае сопел с большими α [8].

Следует отметить, что рост V_z' в центре камеры с возрастанием T_b может привести к повышенному уносу частиц из-за слабого влияния центробежной силы в этой зоне. В связи с этим была выполнена серия экспериментов с выходным отверстием, показанным на рис. 2. Геометрия отверстия перекрывает центральную выходную часть пережима и, как представляется, будет препятствовать уносу частиц из вихревой камеры. На рис. 7, 8 показаны характерные радиальные профили V_z' .

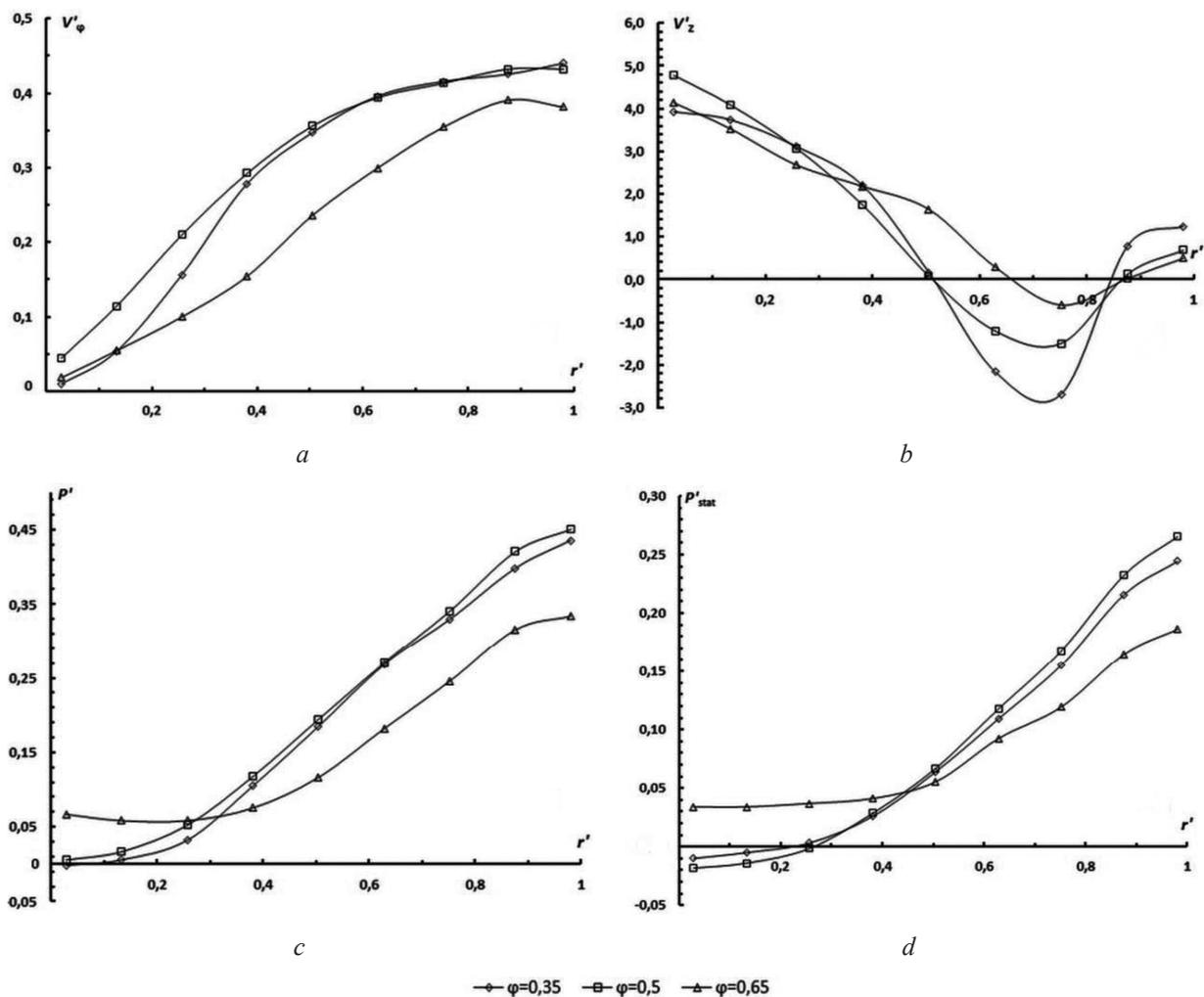


Рис. 3. Безразмерные тангенциальная (a) и продольная (b) скорость, полное (c) и статическое (d) давление в циклонно-слоевой камере с плотным слоем перловой крупы при $Q_\Sigma = 60$ м³/ч, $d_{out}/D = 0,5$, $t_b = t_\varphi = 30$ °С

Fig. 3. The dimensionless tangential (a) and longitudinal (b) velocities, total (c) and static (d) pressures in the cyclone-bed chamber with a fixed bed of pearl barley at $Q_\Sigma = 60$ м³/h, $d_{out}/D = 0,5$, $t_b = t_\varphi = 30$ °С

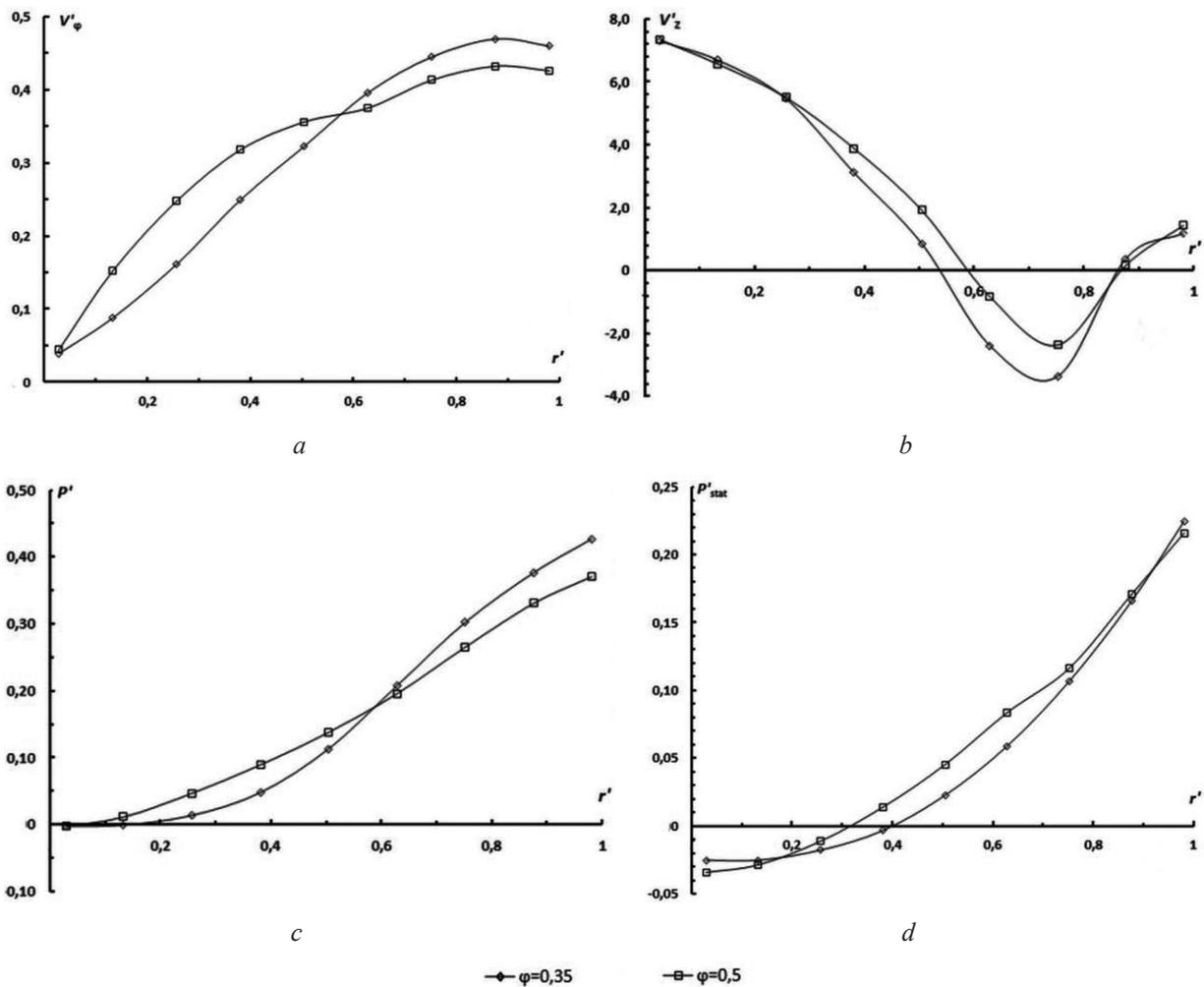


Рис. 4. Безразмерные тангенциальная (а) и продольная (b) скорость, полное (c) и статическое (d) давление в циклонно-слоевой камере с плотным слоем керамзита при $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $d_{\text{out}}/D = 0,5$, $t_b = 180\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\phi} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 4. The dimensionless tangential (a) and longitudinal (b) velocities, total (c) and static (d) pressures in the cyclone-bed chamber with a fixed bed of expanded clay at $Q_{\Sigma} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$, $d_{\text{out}}/D = 0.5$, $t_b = 180\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\phi} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно из рис. 8, величина продольной скорости в центральной части камеры практически не зависит от формы отверстия.

Распределение скоростей и давления в вихревой зоне в присутствии кипящего слоя мелких частиц. Камера с кипящим слоем наиболее актуальна для использования в топках для сжигания твердых мелкодисперсных биотоплив. На рис. 9, 10 показаны распределения V_{ϕ}' , V_z' и P' .

Характерной особенностью условий экспериментов является их проведение при постоянной величине донного дутья и использовании монодисперсных кипящих слоев частиц разного размера. Это обеспечивает условие изменения гидродинамики кипящего слоя при варьировании числа псевдооживления $N = u/u_{mf}$: $N < 1$ слой неподвижен, рост N приводит к более интенсивному кипению и выносу частиц в зону.

Как видно из рис. 9, 10, с ростом числа псевдооживления распределения V_{ϕ}' и P' «опускаются». Нарушение автомодельности по числу N , очевидно, связано с возрастающим влиянием уноса частиц из кипящего слоя. Как показано в [9], более физической величиной, характеризующей интенсивность оживления частиц в неоднородном (с пузырями) кипящем слое, является не число псевдооживления $N = u/u_{mf}$, а число Фруда $Fr = \frac{(u - u_{mf})^2}{gH_{mf}}$, которое использует избыточную скорость фильтрации $u - u_{mf}$. С учетом равенства $u = \frac{4\phi Q_{\Sigma}}{\pi D^2}$ число Фруда в рассматриваемом случае будет

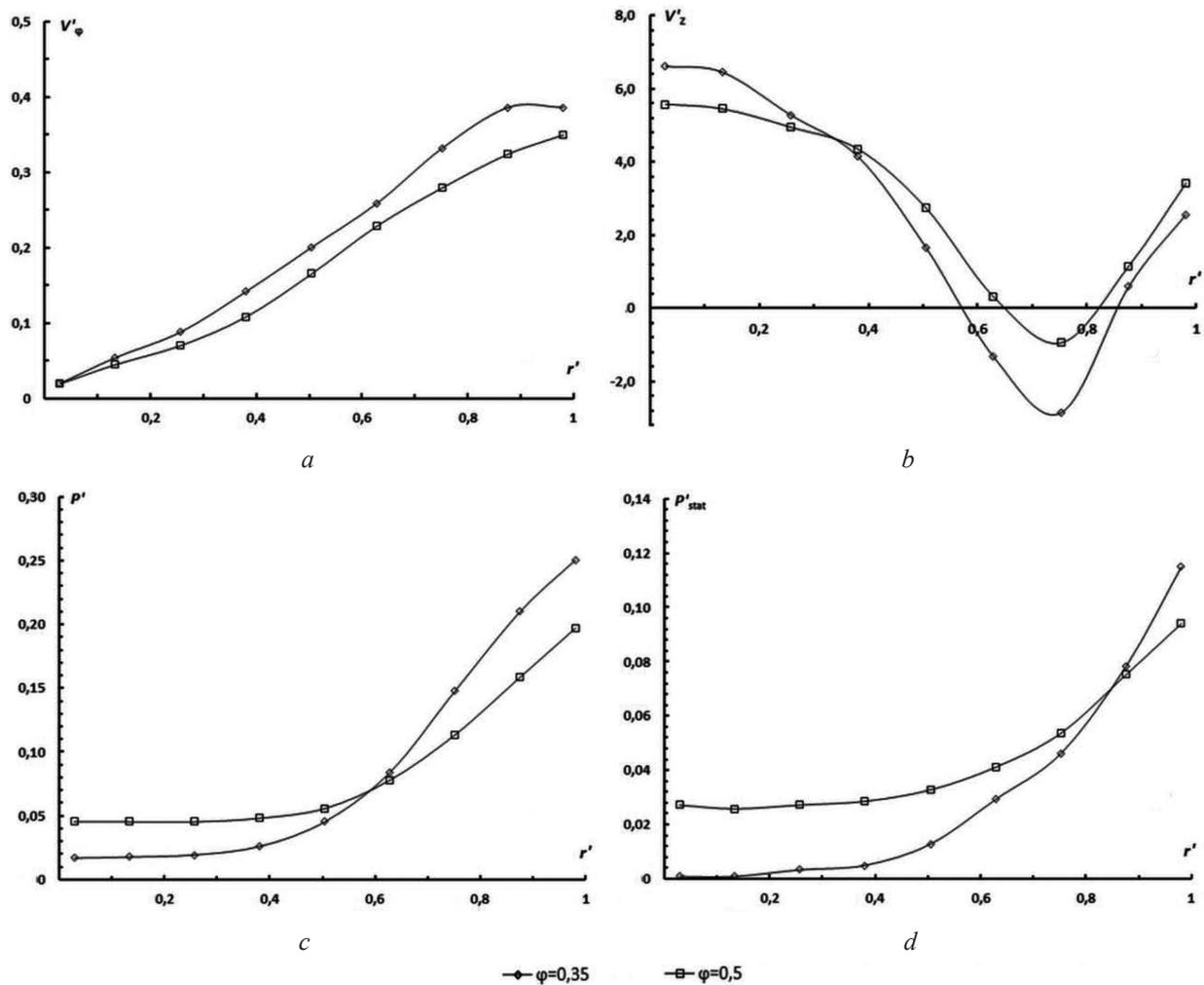


Рис. 5. Безразмерные тангенциальная (а) и продольная (b) скорость, полное (c) и статическое (d) давление в циклонно-слоевой камере с кипящим слоем кварцевого песка (0,35–0,50 мм) при $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $d_{\text{out}}/D = 0,5$, $t_b = 180\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\phi} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
 Fig. 5. The dimensionless tangential (a) and longitudinal (b) velocities, total (c) and static (d) pressures in the cyclone-bed chamber with a fluidized bed of quartz sand (0.35–0.50 mm) at $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $d_{\text{out}}/D = 0.5$, $t_b = 180\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\phi} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{Fr} = \left(\frac{4\varphi Q_{\Sigma}}{\pi D^2} - u_{mf} \right)^2 / gH_{mf}. \quad (2)$$

На рис. 11 показано влияние диаметра пережима d_{out} на распределение давления в вихревой зоне. Практически эквидистантные зависимости свидетельствуют о существенном влиянии d_{out} на величину давления.

Обобщение полученных данных представлено в виде зависимостей:

$$(V'_{\phi})_R = 0,24\text{Fr}^{-0,11}, \quad (3)$$

$$P_R' = 0,07\text{Fr}^{-0,3} \left(\frac{d_{\text{out}}}{D} \right)^{-0,5}. \quad (4)$$

Заметим, что в [8] при $\alpha = 0,024$, $R = 0,196 \text{ м}$ для расчета величины полного избыточного давления при $r = R$ получена аналогичная зависимость:

$$P_R' = 0,14\text{Fr}^{-0,29} \left(\frac{d_{\text{out}}}{D} \right)^{-1,3}. \quad (5)$$

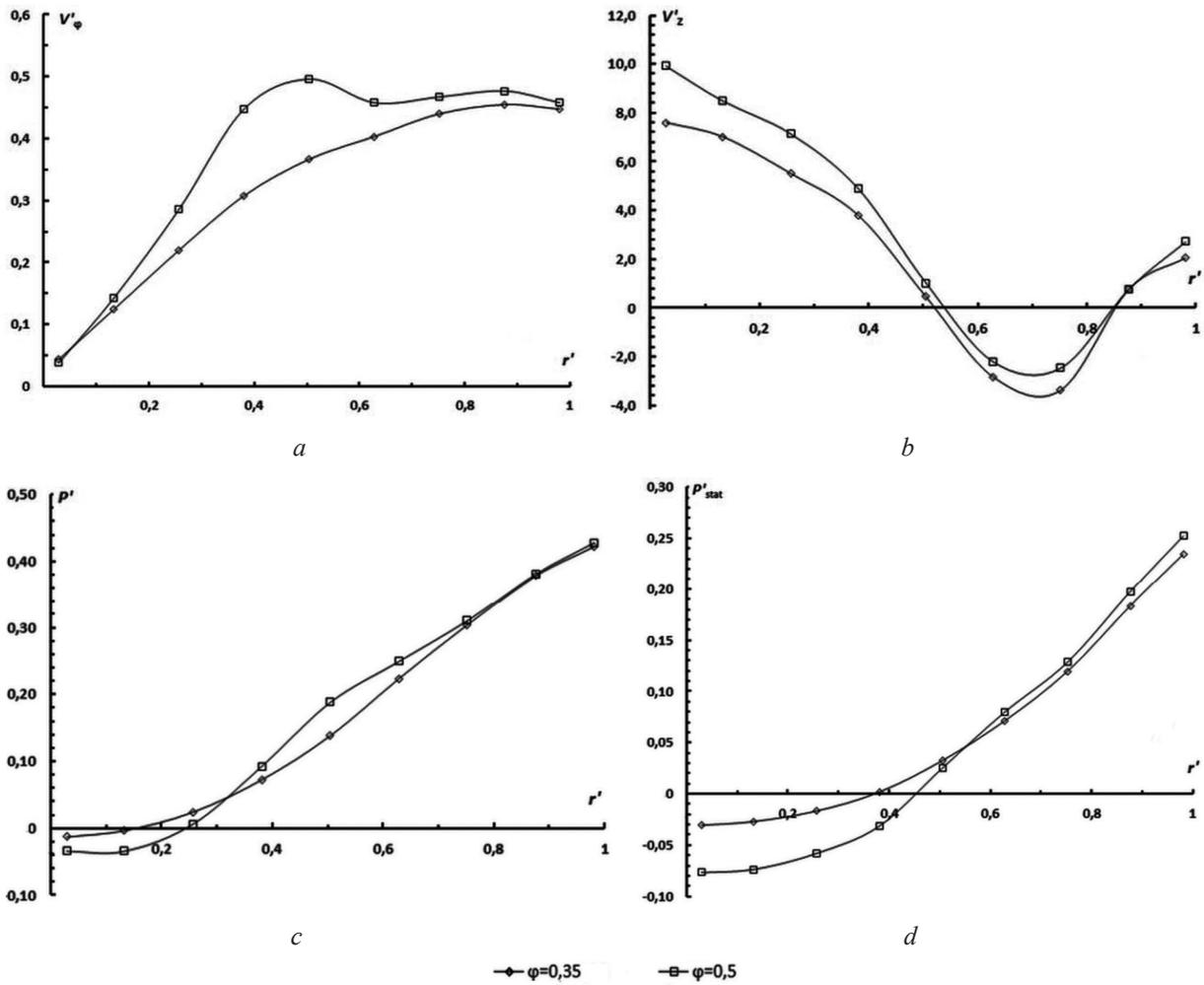


Рис. 6. Безразмерные тангенциальная (a) и продольная (b) скорость, полное (c) и статическое (d) давление в циклонно-слоевой камере с плотным слоем керамзита при $Q_\Sigma = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$, $d_{out}/D = 0,5$, $t_b = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_\varphi = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
 Fig. 6. The dimensionless tangential (a) and longitudinal (b) velocities, total (c) and static (d) pressures in the cyclone-bed chamber with a fixed bed of expanded clay at $Q_\Sigma = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$, $d_{out}/D = 0.5$, $t_b = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_\varphi = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

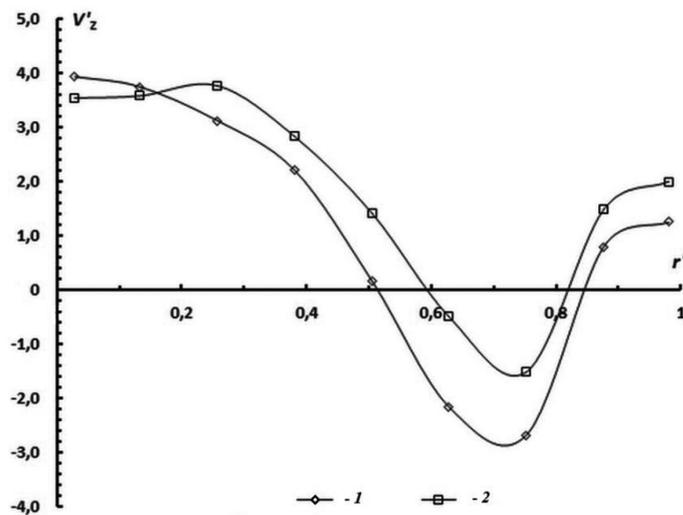


Рис. 7. Безразмерная продольная скорость в циклонно-слоевой камере с плотным слоем перловой крупы при различной форме выходного отверстия и при $Q_\Sigma = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0,35$, $t_b = t_\varphi = 30 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 – одно отверстие; 2 – три отверстия
 Fig. 7. The dimensionless longitudinal velocities in the cyclone-bed chamber with a fixed bed of pearl barley with a different shape of the outlet at $Q_\Sigma = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0.35$, $t_b = t_\varphi = 30 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 – one hole; 2 – three holes

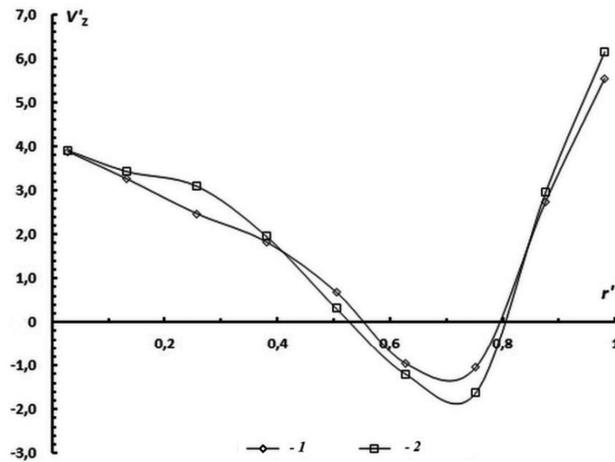


Рис. 8. Безразмерная продольная скорость в циклонно-слоевой камере с кипящим слоем кварцевого песка (0,20–0,28 мм) при различной форме выходного отверстия и при $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0,35$, $t_b = t_{\varphi} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – одно отверстие; 2 – три отверстия
 Fig. 8. The dimensionless longitudinal velocities in the cyclone-bed chamber with a fluidized bed of quartz sand (0.20–0.28 mm) with a different shape of the outlet at $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0.35$, $t_b = t_{\varphi} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – one hole; 2 – three holes

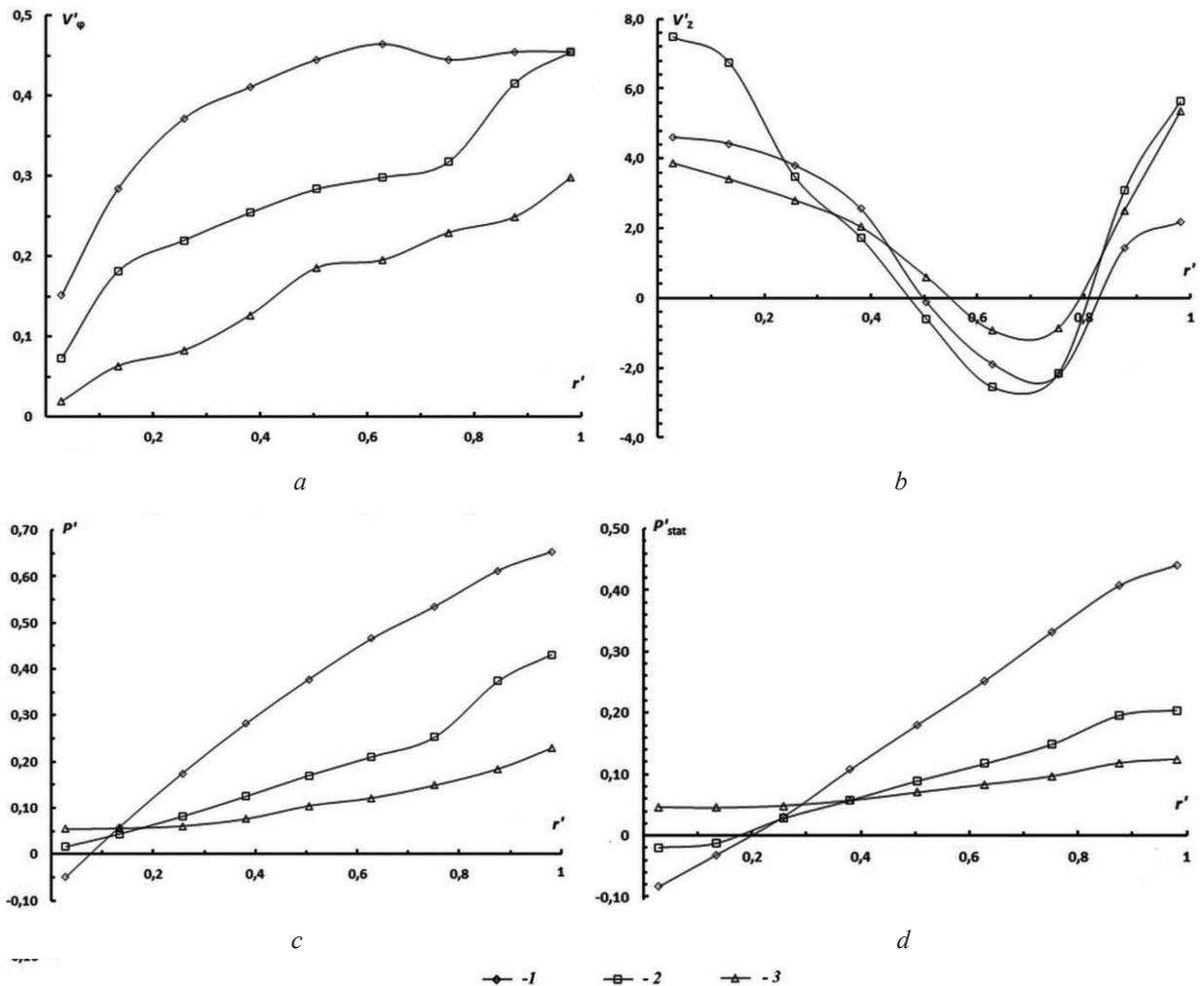


Рис. 9. Безразмерные тангенциальная (a) и продольная (b) скорость, полное (c) и статическое (d) давление в циклонно-слоевой камере при различных режимах псевдоожижения и при $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0,35$, $d_{out}/D = 0,4$, $t_b = t_{\varphi} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 1 – нет кипячения; 2 – кипячение при $N = 1,76$; 3 – кипячение при $N = 4,8$
 Fig. 9. Dimensionless tangential (a) and longitudinal (b) velocity, total (c) and static (d) pressures in the cyclone-bed chamber under different fluidization regimes and at $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0.35$, $d_{out}/D = 0.4$, $t_b = t_{\varphi} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 1 – no fluidization; 2 – fluidization ($N = 1.76$); 3 – fluidization ($N = 4.8$)

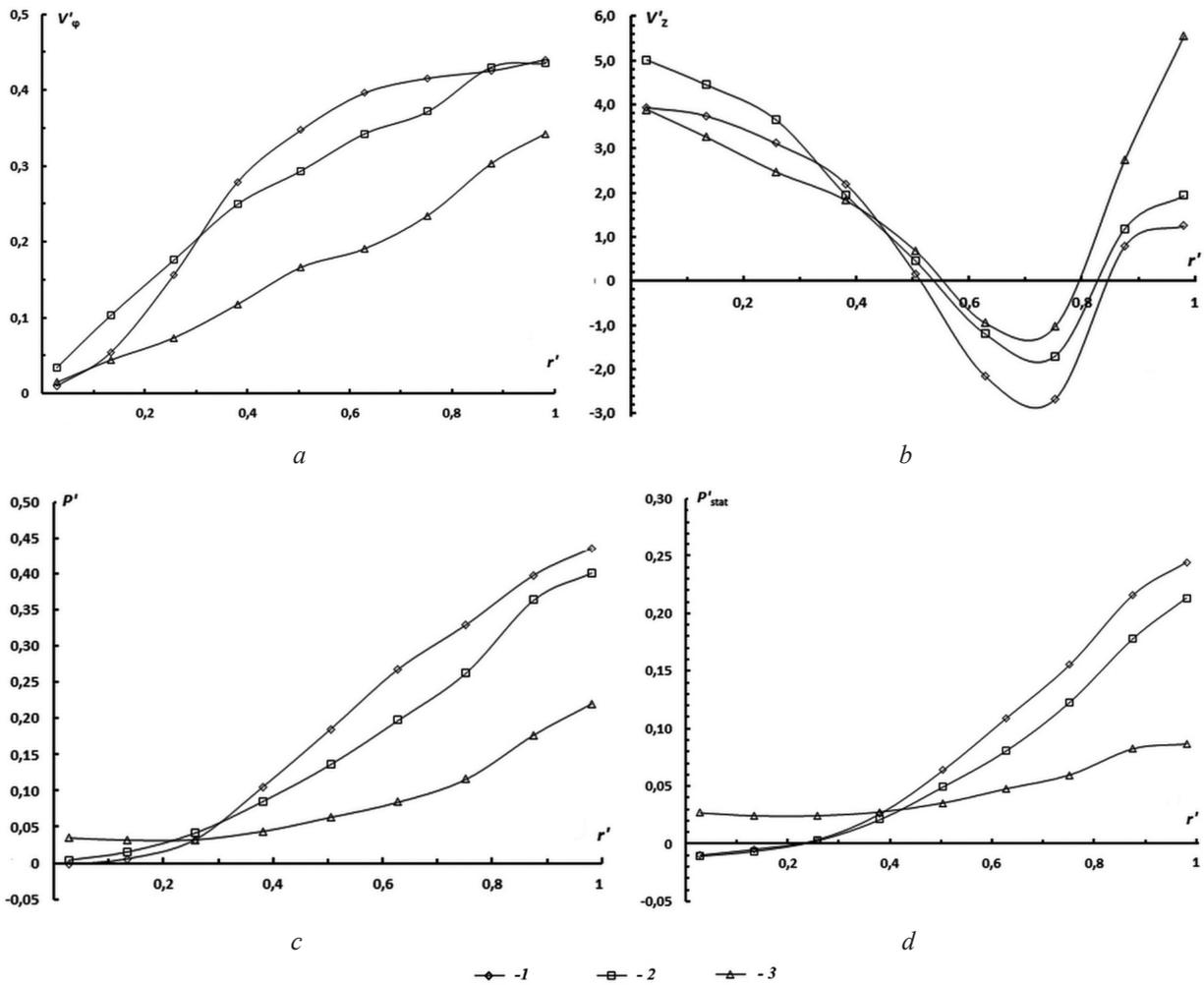


Рис. 10. Безразмерные тангенциальная (a) и продольная (b) скорость, полное (c) и статическое (d) давление в циклонно-слоевой камере при различных режимах псевдооживления и при $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0,35$, $d_{\text{out}}/D = 0,5$, $t_b = t_{\varphi} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – нет кипения; 2 – кипение при $N = 1,76$; 3 – кипение при $N = 4,8$

Fig. 10. Dimensionless tangential (a) and longitudinal (b) velocities, total (c) and static (d) pressures in the cyclone-bed chamber under different fluidization regimes and at $Q_{\Sigma} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$, $\varphi = 0.35$, $d_{\text{out}}/D = 0.5$, $t_b = t_{\varphi} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – no fluidization; 2 – fluidization ($N = 1.76$); 3 – fluidization ($N = 4.8$)

Интересно отметить, что в этих условиях величина $(V_{\varphi}')_R$ практически не изменялась: $(V_{\varphi}')_R \approx 0,8$. Как видно, использование числа Fr в виде (2) позволяет достаточно хорошо учесть влияние аэродинамики кипящего слоя на особенность распределений скорости воздуха и давления в вихревой зоне. Кроме того, структура (2) помимо Q_{Σ} , u_{mf} учитывает и влияние такого важного фактора, как доля донного дутья φ . Следует отметить, что зависимости (3)–(5) свидетельствуют о нарушении автомодельности по числу Fr (а значит, и по величине Q_{Σ} и u_{mf}). При $u < u_{mf}$ слой частиц не оживлен, унос частиц с поверхности слоя практически отсутствует и, как показано в [1], зависимости V_{φ}' , V_z' и P' для неподвижного слоя автомодельны по величине Q_{Σ} . Таким образом, нарушение этой автомодельности в случае кипящего слоя вызвано влиянием на аэродинамику вихревой зоны уноса частиц из кипящего слоя.

Заключение. Установлено влияние температуры донного дутья на приосевые величины продольной скорости воздуха в вихревой зоне. Нарушение автомодельности по числу Фруда распределений безразмерных аэродинамических характеристик вихревой зоны связано с влиянием уноса частиц из кипящего слоя. Показана эффективность использования числа Фруда для обобщения полученных данных – зависимости (3), (4).

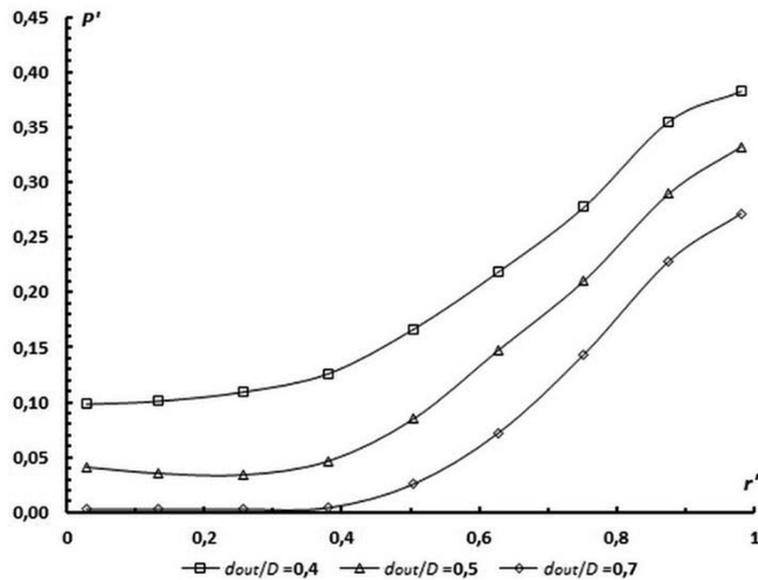


Рис. 11. Безразмерное полное давление в циклонно-слоевой камере с кипящим слоем кварцевого песка (0,35–0,50 мм) при $Q_{\Sigma} = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\varphi = 0,5$, $t_b = t_{\varphi} = 30^{\circ}\text{C}$

Fig. 11. Dimensionless total pressure in the cyclone-bed chamber with a fluidized bed of quartz sand (0.35–0.50 mm) at $Q_{\Sigma} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$, $\varphi = 0,5$, $t_b = t_{\varphi} = 30^{\circ}\text{C}$

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T16K-018).

Acknowledgments

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project T16K-018).

Обозначения

d – диаметр частиц, м; D – диаметр камеры, м; d_{out} – диаметр выхлопного отверстия, м; $\text{Fr} = \frac{(u - u_{mf})^2}{gH_{mf}}$ – число Фруда; g – ускорение свободного падения, м/с²; H_{mf} – высота слоя в начале псевдооживления, м; P – полное избыточное давление, Па, $P' = 2P/(\rho_f V_n^2)$; Q_{Σ} – общий объемный расход воздуха, м³/с; r – радиальная координата, м; $r' = r/R$; R – радиус камеры, м; $\text{Re}_{mf} = u_{mf} d / \nu_f$ – число Рейнольдса; u – скорость фильтрации (скорость донного дутья), м/с; T_b – температура донного дутья, °C; T_n – температура тангенциального дутья, °C; u_{mf} – скорость начала псевдооживления, м/с; V_n – скорость воздуха на выходе из сопла, м/с; V_{φ} – тангенциальная скорость воздуха, м/с; $V_{\varphi}' = V_{\varphi}/V_n$; V_z – продольная скорость воздуха, м/с; $V_z' = V_z / (Q_{\Sigma} / \pi R^2)$; α – живое сечение тангенциальных сопел; ν_f – кинематическая вязкость, м²/с; φ – доля донного дутья; ρ_f – плотность газа, кг/м³.

Индексы:

b – слой; f – газ; mf – начало псевдооживления; n – сопло; Σ – общий.

Список использованных источников

1. Пицуха, Е. А. Сжигание твердого биотоплива в циклонно-слоевой топочной камере: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Е. А. Пицуха. – Минск, 2012. – 173 с.
2. Нахапетян, Е. А. Исследование аэродинамики циклонной топки на натурной модели / Е. А. Нахапетян // Теплоэнергетика. – 1954. – № 9. – С. 10–16.
3. Басина, И. П. К вопросу о горении и сепарации частиц топлива в циклонной топке / И. П. Басина, А. В. Тонконогий // Теплоэнергетика. – 1955. – № 5. – С. 17–21.
4. Кнорре, Г. Ф. Циклонные топки / Г. Ф. Кнорре, М. А. Наджаров. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 216 с.
5. Алексеенко, С. В., Введение в теорию концентрированных вихрей / С. В. Алексеенко, П. А. Куйбин, В. Л. Окулов. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. – 504 с.
6. Митрофанова, О. В. О структурном подобию устойчивых форм спирально-вихревого движения / О. В. Митрофанова // Инженер.-физ. журн. – 2017. – Т. 90, № 5. – С. 1179–1191.
7. Пицуха, Е. А. Закрученные течения в циклонных камерах с соплами малого живого сечения / Е. А. Пицуха, Ю. С. Теплицкий // Инженер.-физ. журн. – 2017. – Т. 90, № 4. – С. 850–861.

8. Пицуха, Е. А. О влиянии уноса частиц из неоднородного кипящего слоя на гидродинамику вихревой надслоевой зоны / Е. А. Пицуха, Ю. С. Теплицкий // Инженер-физ. журн. – 2017. – Т. 90, № 1. – С. 23–28.

9. Teplitskii, Yu. S. Similarity of transport processes in disperse systems with suspended particles / Yu. S. Teplitskiy // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45, iss. 2. – P. 441–449. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00162-4)

References

1. Pitsuha E. A. *Combustion of solid biofuel in a vortex-bed combustion chamber*. Minsk, 2012. 173 p. (in Russian).
2. Nahapetyan E. A. Investigation of aerodynamics of a cyclone furnace on the field model. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 1954, no. 9, pp. 10–16 (in Russian).
3. Basina I. P., Tonkonogij A. V. To the question of combustion and separation of fuel particles in a cyclone furnace. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 1955, no. 5, pp. 17–21 (in Russian).
4. Knorre G. F., Nadzharov M. A. *Cyclone Furnaces*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1958. 216 p. (in Russian).
5. Alekseenko S. V., Kujbin P. A., Okulov V. L. *Introduction to the theory of concentrated vortices*. Novosibirsk, Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. 504 p. (in Russian).
6. Mitrofanova O. V. On the Structural Similarity of Stable Forms of Spiral-Vortex Motion. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 1119–1130. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1666-y>
7. Pitsuha E. A., Teplitskii Yu. S. Swirling Flows in Cyclone Chambers with Nozzles of Small Flow Section. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 4, pp. 806–816. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1629-3>
8. Pitsuha E. A., Teplitskii Yu. S. On the Influence of Particle Entrainment from an Inhomogeneous Fluidized Bed on the Hydrodynamics of the Vortex Over-Bed Zone. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 1, pp. 19–23. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1534-9>
9. Teplitskii Yu. S. Similarity of transport processes in disperse systems with suspended particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, vol. 45, iss. 2, pp. 441–449. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00162-4)

Информация об авторах

Пицуха Евгений Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pit.ea@mail.ru

Бучилко Эдуард Казимирович – научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ebuchilko@gmail.commailto:tep@hmti.ac.by

Теплицкий Юрий Семенович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tep@hmti.ac.by

Information about the authors

Evgenii A. Pitsuha – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pit.ea@mail.ru

Eduard K. Buchilko – Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ebuchilko@gmail.com

Yurii S. Teplitskii – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tep@hmti.ac.by