



Favvora qatlamining gidrodinamik parametrlariga qo'shimcha suyuqlashtiruvchi agent kiritishlarning ta'sirini tadqiq etish

Alisher Sh. Shaislamov¹, Nodirbek A. Abdullayev², Rovshan R. Jurayev^{2,a}

¹ t.f.n., prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; shaislamov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0842-2737>

² PhD, bosh mutaxassis, Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Elektr energiyasi, neft mahsulotlari va gazdan foydalanishni nazorat qilish bosh boshqarmasi, Toshkent, 100047, O'zbekiston; nodirbek_9204@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3141-6020>

^{2,a} bosh mutaxassis, Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Elektr energiyasi, neft mahsulotlari va gazdan foydalanishni nazorat qilish bosh boshqarmasi, Toshkent, 100047, O'zbekiston; rjgreat1994@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4933-6408>

Dolzarblik: yuqori namlikka ega dispers materiallarni, ayniqsa aglomeratsiyaga va beqaror bo'lakchalar hosil bo'lishiga moyil bo'lgan materiallarni quritish issiqlik va massa almashinuvi jarayonlari orasida eng murakkablaridan biri hisoblanadi. Qo'shimcha qiyinchiliklar polidispers tolalash qiluvchi polimerlarni qayta ishlashda yuzaga keladi, chunki ular uchun pseudosuyuqlanish sharoitlarining yomonlashuvi va gidrodinamik rejimning beqarorligi xosdir. Shu munosabat bilan favvora qatlam apparatining barqaror ishlash diapazonini kengaytirish hamda zarrachalar aralashish intensivligini oshirishni ta'minlaydigan konstruktiv yechimlarni izlash muhim ahamiyat kasb etadi.

Maqsad: ushbu ishda apparatning periferik zonalariga issiqlik tashuvchini qo'shimcha berishning qattiq faza harakatiga va jarayonning asosiy gidrodinamik parametrlariga ta'siri o'rganildi.

Usullar: tajribaviy tadqiqotlar havo pastki va yon kirishlar orqali kombinatsiyalangan tarzda uzatiladigan favvora qatlam qurilmasida amalga oshirildi. Aralashish strukturasini baholash uchun impulsli treysler usuli qo'llanildi, olingan javob egri chiziqlari esa momentlar usuli bilan qayta ishlandi. Bundan tashqari, favvoralanish egri chiziqlari tahlil qilindi, ishchi va chegaraviy bosim yo'qotishlari aniqlangan, barqaror favvoralanishning boshlanish shartlari belgilangan hamda gaz oqimini turlicha taqsimlash rejimlarida favvoralanish soni hisoblab chiqilgan.

Natijalar: issiqlik tashuvchi sarfini yon kirishlar foydasiga qayta taqsimlash qatlam gidrodinamikasining sezilarli darajada jadallashishiga olib kelishi ko'rsatildi. Bunda favvoralanish rejimiga o'tish tezligi va maksimal bosim yo'qotilishi kamayadi, favvoralanish sonining ortishi esa apparatda zarrachalarning sirkulyatsion almashinuvi kuchayganini ko'rsatadi. Periferik oqimlarning faollashuvi issiqlik tashuvchidan foydalanish samaradorligini oshirishi, materialga ishlov berish vaqtini qisqartirishi va shu bilan birga ishchi bosim yo'qotilishini maqbul darajada saqlab turishi aniqlandi. Havo oqimlarini taqsimlashning qurilmaning eng barqaror ishlash rejimini ta'minlaydigan ratsional sharoitlari belgilandi.

Xulosa: olingan natijalar periferik zonaga issiqlik tashuvchini qo'shimcha kiritish bilan ishlaydigan favvora qatlam apparatlarini qo'llash yuqori namlikka ega, bo'laklanishga moyil va polidispers materiallarni quritishda ishtiqlik yo'nalish ekanini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: favvora qatlami, issiqlik tashuvchini periferik kiritish, qatlam gidrodinamikasi, yuqori namlikli materiallar, tolalash qiluvchi polimerlar, zarrachalarning aralashishi, treysler usuli, favvoralanish soni.

Исследование влияния дополнительных вводов ожижающего агента на гидродинамические параметры фонтанирующего слоя

Алишер Ш. Шаисламов¹, Нодирбек А. Абдуллаев², Ровшан Р. Жураев^{2,a}

¹ к.т.н., проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; shaislamov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0842-2737>

² PhD, главный специалист, Главное управление инспекции по контролю за использованием электроэнергии, нефтепродуктов и газа при Кабинете Министров, Ташкент, 100047, Узбекистан; nodirbek_9204@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3141-6020>

^{2,a} главный специалист, Главное управление инспекции по контролю за использованием электроэнергии, нефтепродуктов и газа при Кабинете Министров, Ташкент, 100047, Узбекистан. rjgreat1994@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4933-6408>

Актуальность: сушка высоковолажных дисперсных материалов, особенно склонных к агломерации и образованию неустойчивых комков, относится к числу наиболее сложных тепло- и массообменных процессов. Дополнительные трудности возникают при переработке полидисперсных волокнообразующих полимеров, для которых характерно ухудшение условий псевдооживления и неустойчивость гидродинамического режима. В связи с этим представляет интерес поиск конструктивных решений, обеспечивающих повышение интенсивности перемешивания частиц и расширение диапазона устойчивой работы аппарата фонтанирующего слоя.

Цель: в работе исследовано влияние дополнительной подачи теплоносителя в периферийные области аппарата на характер движения твердой фазы и основные гидродинамические параметры процесса. Экспериментальные исследования выполнены на установке фонтанирующего слоя с комбинированной

For citation: Shaislamov A.Sh., Abdullaev N.A., Jurayev R.R. Study of the Effect of Additional Fluidizing Agent Inlets on the Hydrodynamic Parameters of a Spouted Bed. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 2, pp. 139-146.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21205775>

Received: 10.01.2026

Revised: 15.04.2026

Accepted: 11.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Alisher Sh. Shaislamov, Nodirbek A. Abdullaev, Rovshan R. Jurayev, 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



подачей воздуха — через нижний и боковые вводы. Для оценки структуры перемешивания применён импульсный трассерный метод с последующей обработкой кривых отклика методом моментов. Наряду с этим проведён анализ кривых фонтанирования, определены значения рабочего и предельного перепадов давления, установлены условия начала устойчивого фонтанирования и рассчитано число фонтанирования при различных режимах распределения газового потока.

Методы: показано, что перераспределение расхода теплоносителя в пользу боковых вводов способствует заметной интенсификации гидродинамики слоя. При этом снижаются скорость перехода к режиму фонтанирования и максимальный перепад давления, а увеличение числа фонтанирования указывает на усиление циркуляционного обмена частиц в аппарате. Установлено, что активизация периферийных потоков улучшает использование теплоносителя, способствует ускорению обработки материала и одновременно сохраняет рабочий перепад давления на приемлемом уровне. Определены рациональные условия распределения воздушных потоков, при которых достигается наиболее стабильный режим функционирования установки.

Результаты: полученные результаты подтверждают, что применение аппаратов фонтанирующего слоя с дополнительным периферийным вводом теплоносителя является перспективным направлением для сушки высоковлажных, комкующихся и полидисперсных материалов, требующих интенсификации гидродинамического воздействия.

Ключевые слова: фонтанирующий слой, периферийный ввод теплоносителя, гидродинамика слоя, высоковлажные материалы, волокнообразующие полимеры, перемешивание частиц, трассерный метод, число фонтанирования.

Study of the Effect of Additional Fluidizing Agent Inlets on the Hydrodynamic Parameters of a Spouted Bed

Alisher Sh. Shaislamov¹, Nodirbek A. Abdullaev², Rovshan R. Juraev^{2 a}

¹ PhD, Prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; shaislamov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0842-2737>

² PhD, Chief Specialist, Main Department of Inspection for Control over Use of Electricity, Oil Products and Gas under the Cabinet of Ministers, Tashkent, 100047, Uzbekistan; nodirbek_9204@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-3141-6020>

^{2,a} Chief Specialist, Main Department of Inspection for Control over Use of Electricity, Oil Products and Gas under the Cabinet of Ministers, Tashkent, 100047, Uzbekistan. rjgreat1994@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4933-6408>

Relevance: drying of high-moisture dispersed materials, especially those prone to agglomeration and the formation of unstable lumps, is one of the most complex heat- and mass-transfer processes. Additional difficulties arise in the processing of polydisperse fiber-forming polymers, which are characterized by deterioration of fluidization conditions and instability of the hydrodynamic regime. In this regard, the search for design solutions that ensure increased particle mixing intensity and an expanded stable operating range of the spouted bed apparatus is of considerable interest.

Aim: this study investigated the effect of additional supply of the heat carrier to the peripheral zones of the apparatus on the motion of the solid phase and the main hydrodynamic parameters of the process.

Methods: experimental studies were carried out on a spouted bed unit with combined air supply through the lower and side inlets. To assess the mixing structure, an impulse tracer method was used, and the obtained response curves were processed using the method of moments. In addition, spouting curves were analyzed, the operating and limiting pressure drops were determined, the conditions for the onset of stable spouting were established, and the spouting number was calculated for different gas flow distribution modes.

Results: it was shown that redistribution of the heat carrier flow in favor of the side inlets leads to a significant intensification of the bed hydrodynamics. In this case, the transition velocity to the spouting regime and the maximum pressure drop decrease, while an increase in the spouting number indicates enhanced circulation exchange of particles within the apparatus. It was established that activation of peripheral flows improves the efficiency of heat carrier utilization, reduces the material processing time, and at the same time maintains the operating pressure drop at an acceptable level. Rational conditions for air flow distribution were determined, providing the most stable operating regime of the unit.

Conclusion: the obtained results confirm that the use of spouted bed apparatuses with additional peripheral supply of the heat carrier is a promising direction for drying high-moisture, lump-forming, and polydisperse materials that require intensified hydrodynamic action.

Keywords: spouted bed, peripheral heat carrier supply, bed hydrodynamics, high-moisture materials, fiber-forming polymers, particle mixing, tracer method, spouting number.

1. Введение (Introduction)

Процессы сушки высоковлажных волокнообразующих полимерных материалов представляют собой одну из наиболее сложных задач в технологии производства химических волокон. Это обусловлено совокупностью неблагоприятных физико-механических свойств таких материалов, среди которых особенно важны склонность частиц к взаимному слипанию, образование агломератов и широкий гранулометрический состав. Указанные особенности суще-



ственно осложняют организацию устойчивого гидродинамического режима и снижают эффективность теплообмена в традиционных сушильных аппаратах.

Одним из перспективных способов интенсификации сушки подобных материалов является применение аппаратов фонтанирующего слоя. Их использование позволяет обрабатывать дисперсные системы с гораздо более высокой степенью полидисперсности по сравнению с аппаратами кипящего слоя. Существенную роль в этом играет специфика гидродинамики: в центральной части слоя формируется интенсивное восходящее движение газа и частиц, способствующее разрушению возникающих комков, а непродолжительное пребывание материала в зоне максимальных скоростей делает возможной его обработку при повышенных температурах без заметного ухудшения качества продукта.

В связи с этим аппараты фонтанирующего слоя представляют значительный интерес для сушки высоковлажных волокнообразующих полимеров. Дополнительным преимуществом таких аппаратов являются сравнительная конструктивная простота и технологичность изготовления, что делает их привлекательными для практического применения.

Однако наряду с указанными достоинствами аппараты фонтанирующего слоя имеют и ряд ограничений, сдерживающих их более широкое внедрение в промышленную практику. К числу наиболее существенных недостатков относятся повышенный перепад давления в момент начала фонтанирования, требующий использования дутьевых устройств с высоким напором, ограниченный объем активно работающей зоны, недостаточная интенсивность движения частиц в периферийной области слоя, а также сравнительно невысокий расход сушильного агента, который приходится ограничивать во избежание уноса материала из аппарата. В совокупности эти факторы снижают энергетическую и технологическую эффективность процесса.

Одним из подходов к устранению перечисленных недостатков является модификация аппарата за счёт организации дополнительной подачи оживающего агента в периферийную область слоя, характеризующуюся пониженной интенсивностью движения частиц. Такое конструктивное решение позволяет активизировать гидродинамическую обстановку по всему объёму аппарата, усилить циркуляцию твердой фазы и создать более благоприятные условия для протекания процессов тепло- и массообмена. Благодаря циклическому перемещению материала между центральной и периферийной зонами в аппарате формируется более развитый режим взаимодействия частиц с газовым потоком, что в ряде случаев делает подобную схему более эффективной по сравнению с традиционными вариантами фонтанирующего слоя [1–3].

В настоящей работе поставлена задача экспериментально оценить, каким образом дополнительный ввод теплоносителя влияет на структуру перемешивания твердой фазы и основные гидродинамические характеристики аппарата фонтанирующего слоя. Особое внимание уделено таким параметрам, как скорость начала фонтанирования, рабочий перепад давления в слое, унос материала из аппарата, а также распределение скоростей теплоносителя по поперечному сечению аппарата.

2. Методы (Methods and materials)

Экспериментальная часть работы была направлена на оценку влияния дополнительной подачи теплоносителя в периферийную область аппарата фонтанирующего слоя на его гидродинамические характеристики. Исследования проводились на лабораторной установке фонтанирующего слоя, конструкция которой предусматривала подачу газового потока не только через нижнее сечение, но и через боковые каналы, расположенные в периферийной зоне аппарата [1–3].

Для анализа структуры перемешивания дисперсной фазы использовался метод исследования отклика системы на кратковременное импульсное возмущение по концентрации трассирующего вещества [4]. В качестве индикатора применялись зерна пшеницы, предварительно окрашенные красной тушью, что позволяло визуально идентифицировать их в отобранных пробах и определять изменение концентрации трассера во времени.

Проведение опытов осуществлялось по следующей схеме. Исходный материал подавался в аппарат сверху посредством шнекового питателя, а выгрузка производилась через специальный разгрузочный патрубок. При этом загрузка материала ограничивалась конической частью аппарата. Подача оживающего агента, создаваемого вентилятором, осуществлялась через газораспределительную систему одновременно в нижний и боковые вводы. Необходимое соотношение расходов воздуха между этими каналами задавалось по предварительно построенному тарировочному графику. Достижение рабочего режима контролировалось по показаниям микроманометра.

Во всех опытах расход выгружаемого материала поддерживался равным расходу его подачи, что обеспечивало стационарность процесса. После установления устойчивого режима фонтанирования, которому соответствовали постоянство перепада давления в слое и отсут-

ствие частиц трассера в стеклянной колбе пылеуловителя, в слой мгновенно вводили импульсную порцию индикатора. Затем через заранее заданные интервалы времени отбирались последовательные пробы материала. Для каждого значения расхода материала выполнялись два параллельных опыта, а полученные результаты усреднялись. На основе обработанных данных строились экспериментальные C -кривые. Безразмерную концентрацию определяли, как отношение текущей концентрации трассера в отдельной пробе к средней концентрации, вычисленной по совокупности всех отобранных проб.

Изучение гидродинамических характеристик аппарата проводили также путём построения кривых фонтанирования [5]. Для этого в аппарат загружали определённое количество материала, формируя заданную высоту слоя. Далее расход газа, подаваемого через нижнее сечение, постепенно увеличивали, одновременно фиксируя перепад давления по показаниям микроманометра. При исследовании режимов с дополнительными боковыми вводами значения расходов через боковые каналы устанавливали с использованием тарифовочного графика таким образом, чтобы обеспечить одинаковую подачу воздуха через каждый из них.

На первом этапе задавался расход через боковые вводы, достаточный для возникновения локального фонтанирования в периферийной зоне. После этого, при неизменном расходе газа через боковые каналы, последовательно увеличивали подачу воздуха через нижний ввод и получали зависимость перепада давления в слое от скорости газа в нижнем сечении аппарата, то есть зависимость вида $\Delta P = f(v_n)$. Аналогичные измерения проводились при различных фиксированных значениях расхода через дополнительные вводы в интервале:

$$L_6 = 0 \dots 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объектами исследования служили диацетатцеллюлоза и триацетатцеллюлоза. Опыты выполнялись при различных высотах загрузки аппарата материалом. В качестве основного обобщающего параметра, характеризующего режим работы аппарата фонтанирующего слоя с дополнительной подачей теплоносителя, принималось соотношение расходов воздуха $\alpha = \frac{\sum L_6}{\sum L_6 + L_n}$; где $\sum L_6$ — суммарный расход воздуха, поступающего через боковые вводы, а L_n — расход воздуха, подаваемого через нижнее сечение аппарата.

3. Результаты (Results and discussion)

Обработка экспериментальных данных, полученных при регистрации отклика слоя на импульсное введение трассера, выполнялась методом моментов. Для количественного описания структуры перемешивания определялись среднее время пребывания частиц в системе, дисперсия распределения по времени пребывания и соответствующая безразмерная дисперсия. Такой подход позволил сопоставить характер циркуляции твердой фазы при различных режимах работы аппарата.

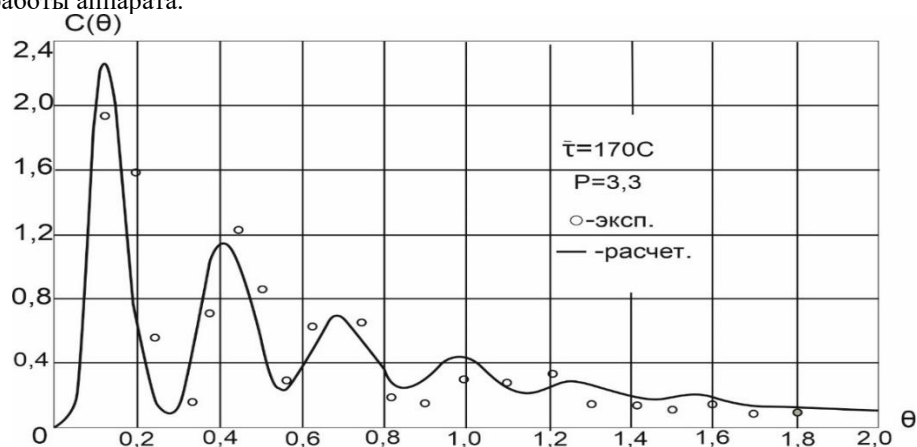


Рис. 1. C -кривые отклика

Fig. 1. C -response curves

Установлено, что экспериментальные кривые отклика имеют колебательный характер с постепенно затухающей амплитудой. Подобная форма свидетельствует о наличии выраженной циклической циркуляции частиц в аппарате. Интервал между соседними максимумами на кривой отклика соответствует продолжительности одного цикла движения частиц по замкнутой траектории. Иными словами, этот параметр характеризует время, за которое частица проходит путь от верхней части периферийной зоны через область действия боковых струй к устью фонтана. Следовательно, по величине цикла циркуляции можно судить о частоте попадания материала в наиболее активные зоны аппарата, где интенсивность гидродинамического воздействия максимальна. Постепенное затухание колебаний показывает, что по мере проте-

кания процесса распределение меченых частиц по объёму слоя становится всё более равномерным, а система приближается по своим свойствам к режиму идеального перемешивания.

Исследование кривых фонтанирования показало, что дополнительная подача газа в периферийную область существенно изменяет гидродинамическое поведение слоя. По сравнению с традиционным вариантом фонтанирующего слоя все характерные точки на кривых фонтанирования смещаются в область меньших скоростей газа, подаваемого через нижнее сечение аппарата. Это указывает на облегчение перехода системы к режиму устойчивого фонтанирования при наличии боковых вводов теплоносителя.

Особое внимание было уделено анализу максимального перепада давления, поскольку именно этот параметр во многом определяет требования к тягодутьевому оборудованию.

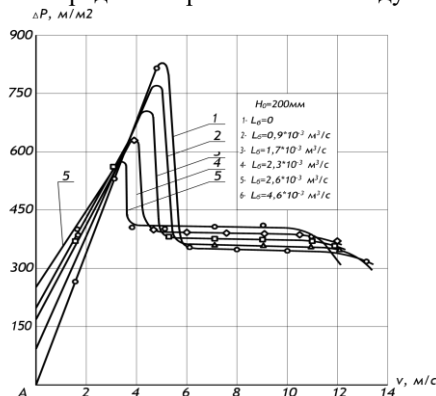


Рис. 2. Кривые фонтанирования

Fig. 2. Fountain curves

Результаты показали, что с увеличением доли воздуха, подаваемого через боковые вводы, максимальный перепад давления снижается. При этом наиболее заметное уменьшение наблюдается до значений параметра α порядка 0,6–0,7; дальнейший рост этого отношения уже практически не влияет на величину максимального перепада давления. Таким образом, дополнительная периферийная подача газа позволяет снизить энергетические затраты, связанные с преодолением начального сопротивления слоя.

Анализ зависимости скорости начала фонтанирования от соотношения расходов воздуха показал аналогичную закономерность. При увеличении параметра α значение скорости $v_{н.ф.} = f(\alpha)$, соответствующей переходу к режиму фонтанирования, уменьшается. Это обусловлено тем, что при более развитой подаче газа через боковые каналы ослабляется сопротивление слоя и для инициирования устойчивого движения частиц требуется меньшая скорость потока через нижний ввод. Как и в случае максимального перепада давления, после достижения $\alpha = 0,6–0,7$ влияние данного параметра становится несущественным.

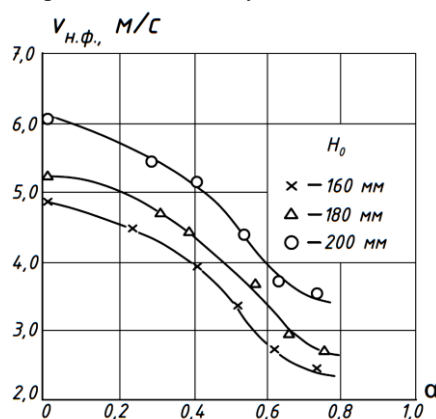


Рис. 3. Зависимость скорости начала фонтанирования от соотношения расходов

Fig. 3. Dependence of the onset rate of fountaining on the flow rate ratio

Рабочее сопротивление слоя, характеризуемое постоянным перепадом давления в установившемся режиме фонтанирования, также зависит от распределения газового потока между нижним и боковыми вводами. Эксперименты показали, что с ростом α величина рабочего перепада давления несколько возрастает, однако это увеличение остаётся сравнительно небольшим. Для подтверждения данной закономерности каждая серия опытов повторялась

трижды, после чего результаты усреднялись. Установленная тенденция объясняется усилением подвижности частиц и интенсификацией их обмена между периферийной зоной и ядром фонтана. При значениях α , близких к 0,6–0,7, боковые струи уже полностью проникают в периферийную область, а вышележащий слой материала переходит в взвешенное состояние.

В дальнейшем изменение соотношения расходов практически не отражается на состоянии слоя и, соответственно, на величине рабочего сопротивления.

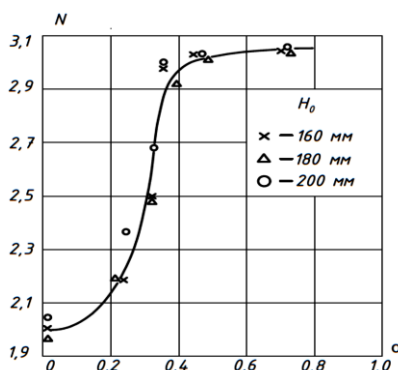


Рис. 4. Функция N от соотношения расходов

Fig. 4. Function N of the expense ratio

Одним из важнейших обобщающих показателей гидродинамической активности аппарата является число фонтанирования (N), отражающее интенсивность перемешивания и обмена частиц между различными зонами слоя. Рост этого показателя означает усиление циркуляции материала, более частое прохождение частиц через ядро фонтана и область действия дополнительных струй, а следовательно — сокращение времени, необходимого для их обработки. Полученные данные показали, что увеличение параметра α оказывает положительное влияние на число фонтанирования: при перераспределении большей доли воздуха в пользу боковых вводов аппарат способен устойчиво работать при более высоких значениях (N). Однако и здесь наблюдается предельный диапазон эффективности: после достижения $\alpha = 0,6–0,7$ дальнейшее увеличение доли боковой подачи уже не приводит к заметному росту числа фонтанирования.

Аналогичная картина получена и при рассмотрении зависимости числа фонтанирования от отношения скорости газа в боковых вводах к скорости начала фонтанирования. Этот параметр косвенно отражает влияние перераспределения расходов газа в аппарате. Показано, что увеличение скорости боковых струй по отношению к скорости начала фонтанирования сопровождается ростом числа фонтанирования, то есть способствует дополнительной активизации гидродинамического режима. Однако после достижения некоторого предельного значения, соответствующего $\alpha = 0,6–0,7$, дальнейший рост этого отношения уже не изменяет интенсивность перемешивания.

В целом результаты исследования свидетельствуют о том, что дополнительная подача теплоносителя в периферийную зону аппарата фонтанирующего слоя приводит к улучшению его гидродинамических характеристик. Наиболее рациональный режим достигается при соотношении расходов воздуха, соответствующем $\alpha = 0,6–0,7$, поскольку именно в этой области одновременно обеспечиваются снижение максимального перепада давления и скорости начала фонтанирования, а также рост числа фонтанирования без существенного увеличения рабочего сопротивления слоя.

4. Обсуждение (Discussion)

Интерпретация экспериментальных кривых отклика показала, что характер перемешивания твердой фазы в аппарате определяется не только временем пребывания частиц, но и интенсивностью их циркуляционного движения между различными зонами слоя. Установлено, что с увеличением среднего времени пребывания возрастает и параметр (P), используемый для количественной оценки циркуляции материала. Это указывает на более выраженное участие частиц в повторяющихся циклах движения внутри аппарата. Вместе с тем при очень больших значениях (P), соответствующих предельному увеличению среднего времени пребывания, режим перемешивания по своим признакам начинает приближаться к идеальному смешению. Однако в исследованных условиях работы, выбранных как наиболее рациональные, структура движения твердой фазы сохраняла специфические черты, отличающие её от модели идеального перемешивания.



Определение параметров гидродинамической модели осуществлялось на основе экспериментально найденных характеристик функции отклика. Исходными величинами служили среднее время пребывания материала, расстояние между соседними максимумами на безразмерной кривой отклика и значениями безразмерной дисперсии. По совокупности этих данных рассчитывался параметр (P), отражающий интенсивность циркуляционного обмена. Один из параметров модели задавался с учётом геометрии аппарата, тогда как другой не мог быть непосредственно найден из геометрических соотношений из-за сложности учёта расширения слоя и размеров верхней фонтанирующей области. Поэтому его значение определялось расчётным путём — через решение соответствующего уравнения модели при дополнительном ограничении, связывающем параметры между собой. После нахождения всех необходимых коэффициентов строилась расчётная функция отклика для тех же режимов, при которых проводились эксперименты. Такой подход позволил сопоставить теоретическое описание с реальным поведением системы и уточнить представление о механизме перемешивания материала в аппарате.

С физической точки зрения особенности поведения аппарата можно объяснить изменением структуры слоя при переходе к режиму фонтанирования. В обычном, то есть «чистом», фонтанирующем слое при повышении скорости газа у основания слоя сначала образуется газовая полость, перекрытая сверху уплотнённым сводом из частиц материала. По мере дальнейшего увеличения расхода газа эта полость растёт, преобразуется во внутренний канал и сопровождается увеличением сопротивления слоя. Когда канал достигает определённой глубины, происходит его прорыв к поверхности, что вызывает резкое снижение сопротивления. Именно этим объясняется наличие выраженного пика давления на кривой фонтанирования.

В аппарате, оснащённом дополнительными боковыми вводами теплоносителя, данный механизм заметно изменяется. При увеличении отношения расходов газа через боковые и нижний вводы уменьшается плотность уплотнённой зоны над внутренним каналом. Когда значение α достигает диапазона 0,6–0,7, боковые струи начинают эффективно пронизывать периферийную часть слоя, а материал, находящийся выше уровня их ввода, переходит в более подвижное, близкое к взвешенному состояние. В таких условиях внутренний канал прорывается к поверхности раньше, чем в аппарате без дополнительных вводов, то есть при меньших скоростях газа, подаваемого снизу. Следовательно, перестройка структуры слоя и переход к режиму устойчивого фонтанирования требуют меньших энергетических затрат. Именно этим, по-видимому, объясняются уменьшение максимального перепада давления и снижение скорости начала фонтанирования, выявленные в эксперименте.

Отдельного рассмотрения заслуживает зависимость числа фонтанирования от отношения скорости газа в боковых вводах к скорости начала фонтанирования. Этот показатель можно рассматривать как косвенную характеристику перераспределения общего расхода газа между центральной и периферийной зонами аппарата. Полученные результаты показывают, что увеличение скорости боковых струй приводит к возрастанию числа фонтанирования, а значит — к активизации циркуляции частиц и интенсификации обмена между зонами слоя. Тем самым подтверждается вывод, сделанный при анализе зависимости ($N=f(\alpha)$): усиление периферийной подачи газа положительно влияет на гидродинамическую активность аппарата. Однако данный эффект проявляется лишь до определённого предельного уровня. После достижения значений, соответствующих $\alpha = 0,6–0,7$, дальнейшее увеличение отношения скоростей уже не сопровождается ростом числа фонтанирования. Это свидетельствует о режиме, при котором интенсификация боковой подачи практически не изменяет движение материала.

Таким образом, обсуждение полученных результатов позволяет заключить, что дополнительный ввод теплоносителя в периферийную зону оказывает комплексное влияние на гидродинамику аппарата фонтанирующего слоя. Он не только изменяет механизм формирования фонтанирующего режима и снижает энергетические затраты на его достижение, но и способствует усилению внутренней циркуляции материала. Наиболее выраженный эффект наблюдается в области значений $\alpha = 0,6–0,7$, которую можно рассматривать как рациональный диапазон работы аппарата с точки зрения гидродинамической эффективности.

5. Заключение (Conclusion)

Проведённые экспериментальные исследования показали, что дополнительная подача теплоносителя в периферийную зону аппарата оказывает выраженное положительное влияние на его гидродинамический режим. Совокупность полученных результатов свидетельствует о том, что такая конструктивная модификация способствует более устойчивому протеканию процесса и расширяет технологические возможности аппарата фонтанирующего слоя.

Прежде всего установлено, что наличие дополнительных вводов приводит к снижению максимального перепада давления в слое. Это позволяет рассматривать эту схему как промежуточную по своим гидродинамическим особенностям между классическим фонтанирующим



щим и псевдооживленным слоями, для которого характерны менее выраженные пики давления. Одновременно уменьшается скорость, необходимая для возникновения режима фонтанирования, что указывает на облегчение перехода системы в рабочее состояние.

Ещё одним важным результатом является увеличение числа фонтанирования, отражающего интенсивность внутренней циркуляции частиц. Рост этого показателя означает, что аппарат способен функционировать в более активном гидродинамическом режиме по сравнению с традиционным вариантом без дополнительных вводов. В практическом отношении это выражается в расширении области устойчивого существования фонтанирующего слоя и в более эффективном вовлечении материала в циркуляционное движение.

Показано также, что дополнительная подача газа способствует увеличению нагрузки ядра по твердой фазе. Вследствие этого улучшается использование теплоносителя, возрастает полнота его отработки и сокращается продолжительность обработки материала. При этом рост рабочего перепада давления оказывается незначительным, что делает такой режим гидродинамически и энергетически оправданным.

Анализ совокупности гидродинамических параметров показал, что по мере увеличения отношения расходов воздуха α все основные характеристики аппарата изменяются закономерно, однако после достижения диапазона $\alpha = 0,6-0,7$ выходят на практически установившийся уровень. Это позволяет рассматривать указанный интервал как рациональную область соотношения расходов воздуха через боковые и нижний вводы с точки зрения обеспечения наиболее благоприятного гидродинамического режима работы аппарата.

Сформированная в аппарате структура слоя имеет комбинированный характер. Часть материала, расположенная выше уровня дополнительных вводов, находится в условиях струйно-псевдооживленного состояния, тогда как в нижней части сохраняются характерные признаки организованного движения, присущего классическому фонтанирующему слою. Такое сочетание двух типов взвешенного состояния в пределах одного аппарата создаёт интенсивную гидродинамическую среду, благоприятную для обработки склонных к комкованию, высоковлажных и широкофракционных дисперсных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаисламов А.Ш., Абдуллаев Н.А., Жураев Р.Р. Математическое моделирование структуры перемешивания твердой фазы в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным вводом теплоносителя. №2 (2025). (2026). //Проблемы энерго- и ресурсосбережения, (2), 199–201. <https://energy.tdtu.uz/index.php/journal/article/view/207>.
2. Шаисламов А.Ш., Жураев Р.Р. Интенсификация тепло-и массообмена при сушке волокнообразующих полимеров в аппарате фонтанирующего слоя. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения, №85 2024, 200-204.
3. Шаисламов А.Ш., Абдуллаев Н.А., Жураев Р.Р. Теоретические исследования кинетики сушки в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным вводом теплоносителя. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения, №87 2024, 241-248.
4. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. - М.: Химия. 1976,- 463 с.
5. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М., Химия. – 1984. - 320 с.

REFERENCES

1. Shaislamov A.Sh., Abdullaev N.A., Juraev R.R. Mathematical modeling of the solid phase mixing structure in a spouted bed apparatus with additional coolant input. No. 2 (2025). (2026). Contents. Problems of Energy and Source Saving, (2), 199–201. <https://energy.tdtu.uz/index.php/journal/article/view/207>. (In Russ.).
2. Shaislamov A.Sh., Zhuraev R.R. Intensification of heat and mass transfer during drying of fiber-forming polymers in a spouted bed apparatus. Journal of Problems of Energy and Source Saving, No. 85 2024, 200–204. (In Russ.).
3. Shaislamov A.Sh., Abdullaev N.A., Zhuraev R.R. Theoretical studies of drying kinetics in a spouted bed apparatus with additional coolant injection. Journal of Problems of Energy and Source Saving, No. 87, 2024, pp. 241–248. (In Russ.).
4. Kafarov, V.V. Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology. Moscow: Chemistry, 1976, 463 p. (In Russ.).
5. Sazhin, B.S. Basics of Drying Technique. Moscow: Chemistry, 1984, 320 p. (In Russ.).