



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.096.5

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.030



ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЦЕТИЛСАЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

Михаил Степанович Василишин ¹, Анастасия Владимировна Балахнина ²,
Олег Сергеевич Иванов ³, Анатолий Геннадьевич Карпов ⁴,
Александра Александровна Антонникова ⁵

^{1,3,4,5} Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

¹ osi85@mail.ru

² Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация. Представлены результаты экспериментального изучения поведения слоя ацетилсалициловой кислоты при его импульсном псевдооживлении. Приводится описание экспериментальной установки, контрольно-измерительных приборов и оборудования. Установлено, что в диапазоне частот пульсации воздуха от 0,5 до 3,0 Гц наблюдается интенсивная крупномасштабная циркуляция обрабатываемого материала. Расширение слоя становится максимальным, а его сопротивление – наоборот, минимально. При частотах пульсации более 3,0 Гц характерна мелкомасштабная циркуляция материала. Расширение слоя незначительно уменьшается, а его сопротивление возрастает. Пульсирующий слой во всём диапазоне изменения параметров процесса был устойчив в отношении залегания на газораспределительной решётке. Приводятся эмпирические зависимости для расчёта расширения слоя и его гидравлического сопротивления. Полученные сведения могут быть полезными для разработчиков технологий обработки дисперсных материалов в системах «газ–твёрдое».

Ключевые слова: ацетилсалициловая кислота, пульсирующий слой, расширение и гидравлическое сопротивление слоя.

Для цитирования: Исследование расширения и гидравлического сопротивления пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты / М. С. Василишин [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 238–241. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.030. EDN: <https://elibrary.ru/ABQRFN>.

Original article

RESEARCH OF EXPANSION AND HYDRORESISTANCE OF PULSING BED OF ACETYLSALICYLIC ACID

Mikhail S. Vasilishin ¹, Anastasia V. Balahnina ², Oleg S. Ivanov ³,
Anatoly G. Karpov ⁴, Alexandra A. Antonnikova ⁵

^{1,3,4,5} Institute for Problems Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia

¹ osi85@mail.ru

² Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov's Altai State Technical University, Biysk, Russia

Abstract. Results of experimental studying of bed behavior of acetylsalicylic acids at its pulsing fluidization are presented. The description of experimental setup, the instrumentation and the equipment is resulted. It is established, that over the range a pulsation frequency of air from 0,5 to 3,0Hz intensive large-scale circulation of a processed material is observed. Bed expansion becomes maximum, and its resistance - on the contrary, minimum. At a pulsation frequency more 3,0Hz fine-scale circulation of a material is characteristic. Bed expansion slightly decreases, and its resistance increases. The pulsing bed in all range of change of process parameters was resistant to in the relation of laying on gas distributive lattice. Empirical dependences for calculation of bed expansion and its hydroresistance are resulted. The gained data can be useful to development engineers of technologies for processing of disperse materials in systems "gas-solid".

Keywords: acetylsalicylic acid, pulsing layer, expansion and hydroresistance of bed.

For citation: Vasilishin, M. S., Balahnina, A. V., Ivanov, O. S., Karpov, A. G. & Antonnikova, A. A. (2025). Research of expansion and hydroresistance of pulsing bed of acetylsalicylic acid. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 238-241. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.030. EDN: <https://elibrary.ru/ABQRFN>.

© Василишин М. С., Балахнина А. В., Иванов О. С., Карпов А. Г., Антонникова А. А., 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЦЕТИЛСАЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Псевдооживление является одним из наиболее распространённых способов обеспечения межфазного взаимодействия в системах «газ–твёрдое». При этом, за счёт эффективного контакта фаз удаётся значительно увеличить удельную производительность оборудования при проведении таких технологических процессов, как смешение, сушка, обжиг и т.п. [1, 2].

Однако влажные и тонкодисперсные материалы зачастую не удаётся перевести в оживлённое состояние продувкой стационарным потоком газа вследствие наличия у них значительных сил адгезионно-когезионного взаимодействия. Такого рода материалы относятся к группе С по классификации Гелдарта [3], и их обработка в псевдооживлённом слое является затруднительной или вообще невозможной из-за каналообразования и последующего «залегания» обрабатываемого продукта на газораспределительной решётке аппарата.

Исключение отмеченных недостатков возможно при наложении механических колебаний на весь аппарат или на его отдельные части [4, 5], а также при использовании ультразвуковых воздействий [6]. Однако это в значительной мере усложняет конструкцию самого аппарата, снижает его надёжность и увеличивает капитальные затраты на технологический процесс в целом.

В ряде работ [7–9] показано, что низкочастотные пульсационные воздействия оживляющего агента стабилизируют гидродинамику слоя и полностью устраняют каналообразование при одновременном улучшении качества перемешивания материала. Вместе с тем, для расчёта и проектирования оборудования с пульсирующим слоем необходимы сведения о влиянии режимов обработки (частота пульсации, скважность импульса и т.д.) на его гидравлическое сопротивление и степень расширения.

Сведения, имеющиеся в литературе по данному вопросу [7, 8, 10, 11], немногочисленны и во многом противоречивы. Их использование для расчёта режимов обработки конкретных материалов может приводить к значительным неточностям.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическая оценка влияния режимов импульсного псевдооживления слоя ацетилсалициловой кислоты на гидравлическое сопротивление и степень его расширения.

Ацетилсалициловая кислота (Acidum acetylsalicylicum) является широко распространённым лекарственным средством, обладающим обезболивающим, жаропонижающим и противовоспалительным действием [12]. Благодаря безопасности и клинической эффективности препарат входит в список важнейших лекарственных средств ВОЗ. Кристаллический продукт – типичный представитель дисперсных материалов, относящихся к группе С, и его обработка в псевдооживлённом слое является затруднительной по ранее названным причинам.

Исследование импульсного псевдооживления ацетилсалициловой кислоты проводили на установке, схема которой показана на рисунке 1.

В её состав входит аппарат 1 с рабочей камерой прямоугольного поперечного сечения 0,15 x 0,02 м и высотой 0,45 м. Аппарат имеет газоподводящий узел и снабжён комплектом беспровальных решёток, обеспечивающих необходимое газораспределение в слое. Для наблюдения за поведением слоя стенки камеры выполнены из оргстекла. Подача оживляющего агента (воздух) производится напорной газодувкой 2, а прерывание потока – механическим клапаном-пульсатором 3 роторного типа, работающим от электронного блока управления 4. Отработанный воздух очищается от частиц ацетилсалициловой кислоты в рукавном фильтре 5 с подключенным к нему съёмным контейнером 6 для сбора уноса. Необходимое разрежение в установке создаётся хвостовым вентилятором 7.

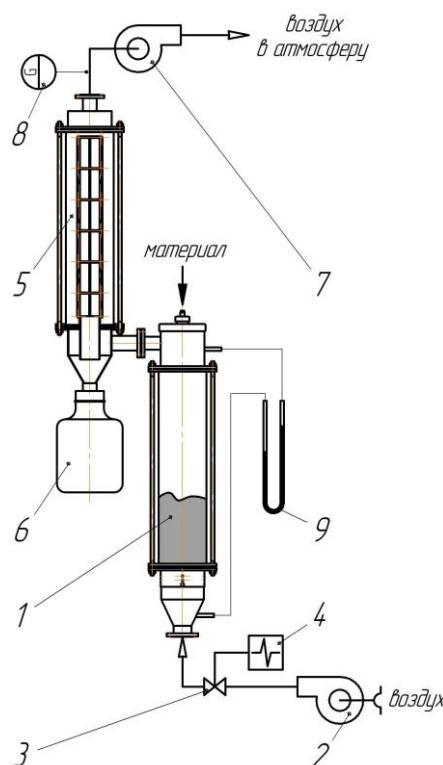


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Figure 1 – Experimental setup diagram

Установка укомплектована приборами контроля параметров процесса. Расход воздуха на псевдооживление измеряли при помощи термоанемометра 8 (модель TESTO-425). Гидравлическое сопротивление пульсирующего слоя оценивали по показаниям дифференциального манометра 9, шкала которого укреплена на лицевой стенке рабочей камеры аппарата 1. Требуемая частота прерывания потока воздуха задавалась при помощи электронного блока управления клапаном-пульсатором.

Изучали влияние скорости воздуха w_p и частоты пульсации f на гидравлическое сопротивление $\Delta P_{сл}$ и относительное расширение $(H_{сп} - H_0)/H_0$. Скорость w_p изменялась в пределах 0,08–

0,16 м/с, а частота f – от 0,5 до 7,0 Гц. Эксперименты проводили при высоте неподвижного слоя $H_0 = 0,1$ м. Сквозность импульса ψ , т.е. отношение времени открытого состояния клапана-пульсатора к периоду пульсации, во всех опытах составляла 0,5. Применяли газораспределительные решётки с долей «живого» сечения $\varphi = 0,15$ и $\varphi = 0,2$.

Для исключения негативных эффектов, связанных с налипанием продукта на стенки рабочей камеры, проводили обработку их внутренней поверхности антистатическим спреем. В экспериментах использовалась ацетилсалициловая кислота, выпускаемая в соответствии с ФС.2.1.0006.15. Влажность продукта не превышала 0,1 % (масс.). Эквивалентный размер частиц, определяемый при помощи оптического анализатора (модель PIP9.1), составил $d_4 = 0,245 \cdot 10^{-3}$ м. Истинная плотность определялась пикнометром (модель Ассу РусII 1340) и составляла $\rho_ч = 1348$ кг/м³.

Микрофотография частиц ацетилсалициловой кислоты и кривые их распределения по размерам представлены на рисунке 2, а, б.

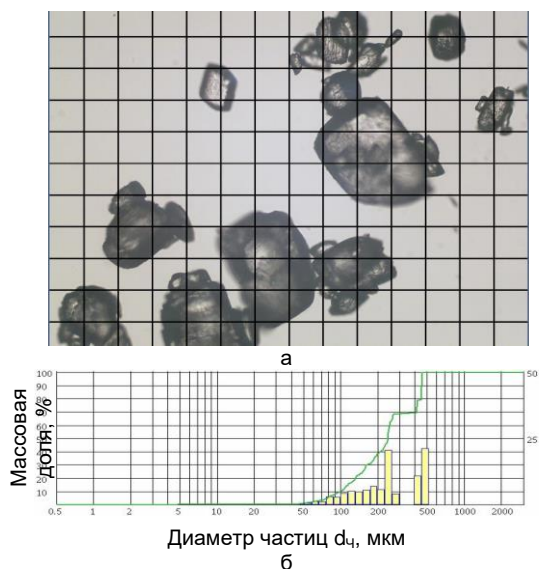


Рисунок 2 – Микрофотография частиц ацетилсалициловой кислоты (x100) и кривые их распределения по размерам

Figure 2 – Micrograph of acetylsalicylic acid (x100) particles and their size distribution curves

Визуальными наблюдениями установлено, что пульсирующая подача воздуха делает слой более однородным. При этом полностью отсутствует каналообразование и залегание обрабатываемого материала на газораспределительной решётке. На рисунке 3 показаны экспериментальные зависимости относительного расширения пульсирующего слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от частоты прерывания потока воздуха.

Установлено, что импульсному псевдооживлению слоя в диапазоне частот от 0,5 до 3,0 Гц предшествует образование у его нижней границы воздушной прослойки, которая в дальнейшем трансформируется в пузыри, создающие интенсивную крупномасштабную циркуляцию обрабатываемого материала. Относительное расширение слоя в этом случае принимает максимальные значения, а его гидравлическое сопротивление –

наоборот, минимально. При увеличении скорости воздуха от 0,08 до 0,16 м/с характер полученных зависимостей сохраняется.

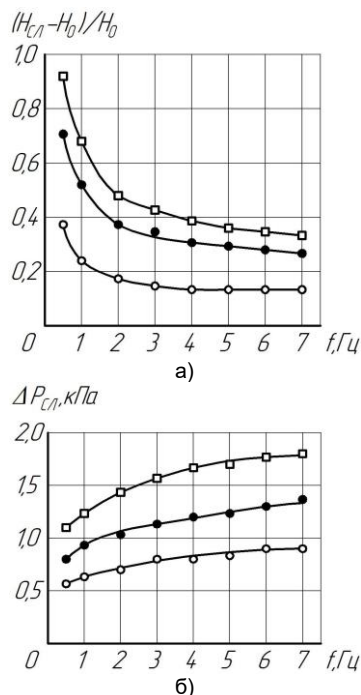


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости относительного расширения пульсирующего слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от частоты прерывания потока воздуха

Figure 3 – Experimental dependences of the relative expansion of the pulsating layer (а) and its hydraulic resistance (b) on the frequency of interruption of the air flow

При частотах пульсации более 3,0 Гц картина псевдооживления материала изменяется. Толщина воздушной прослойки существенно сокращается, а в некоторых случаях она вообще исчезает. Пузыри образуются непосредственно на решётке аппарата. Их размер с ростом частоты пульсации уменьшается, а общее количество возрастает. В слое наблюдается мелкомасштабная циркуляция материала. При этом расширение слоя уменьшается, а его сопротивление несколько возрастает. Увеличение скорости воздуха в исследованном диапазоне частот пульсации не оказывает существенного влияния на характер полученных зависимостей.

Заметного влияния доли «живого» сечения газораспределительной решётки на расширение и гидравлическое сопротивление пульсирующего слоя в исследованном диапазоне изменения параметров процесса не установлено.

Процесс расширения пульсирующего слоя можно представить зависящим от двух составляющих, характеризующих псевдооживление в стационарном режиме и при прерывистой подаче воздуха. В [13] показано, что максимальная высота пульсирующего слоя рассчитывается по зависимости:

$$H_{сл} = H_0 [(1 - \varepsilon_0) / (1 - \varepsilon_п) + (0,525 \cdot 10^{-3} / St_h)^{1,3}], \quad (1)$$

где ε_0 – порозность неподвижного слоя (принимали $\varepsilon_0 = 0,4$); $\varepsilon_п$ – порозность слоя в рабочем состоянии (при пульсации).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ АЦЕТИЛСАЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТЫ

Нестационарная составляющая определяется величиной критерия Струхала:

$$St_h = (d_c \cdot f) / w_p \quad (2)$$

Зависимость (1) может применяться в диапазоне $0,8 \cdot 10^{-3} \leq St_h \leq 18 \cdot 10^{-3}$. Скорость воздуха w_p рассчитывали в соответствии с выражением, полученным в [8]:

$$w_p = w_0(0,85\psi + 0,15), \quad (3)$$

где w_0 – скорость начала псевдооживления материала в стационарном режиме, м/с.

Необходимо отметить, что расчёт по уравнению (3) правомочен только при соблюдении условий: $0,2 \cdot 10^{-3} \leq d_c \leq 4,0 \cdot 10^{-3}$ м и $0,2 \leq \psi \leq 0,8$.

Порозность слоя в рабочем режиме, входящая в уравнение (1), рассчитывается, согласно [7], по зависимости:

$$\varepsilon_p = ((18Re_p + 0,36Re_p^2) / Ar)^{0,21}, \quad (4)$$

где $Re_p = w_p d_c \rho / \mu$ – пульсационный критерий Рейнольдса; $Ar = d_c^3 \rho g / \mu^2$ – критерий Архимеда.

Сравнение экспериментальных и расчётных данных по расширению пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты показывает, что погрешность вычислений по уравнению (1) не превышает 15 %.

Опытные данные по гидравлическому сопротивлению слоя (с погрешностью, не превышающей 12 %) описываются уравнением:

$$\Delta P_{сл} = 1,8\rho_n g H_0 Re_p^{-0,15} Fr^{0,7} St_h^{0,2}, \quad (5)$$

где ρ_n – насыпная плотность ацетилсалициловой кислоты, кг/м³ (принимали $\rho_n = 572$ кг/м³); $Fr = w_p^2 / (g d_c)$ – критерий Фруда.

Уравнение (5) справедливо при соблюдении следующих ограничительных условий: $0,5 \leq Re_p \leq 15$; $2 \cdot 10^{-3} \leq St_h \leq 22 \cdot 10^{-3}$; $0,5 \leq Fr \leq 12$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован характер поведения пульсирующего слоя ацетилсалициловой кислоты при изменении режимных параметров процесса. Подтверждена устойчивость режимов псевдооживления материала и отсутствие его «залегания» на газораспределительной решётке аппарата. Предложены эмпирические зависимости для расчёта максимальной высоты пульсирующего слоя и его сопротивления, которые с достаточной для инженерных оценок точностью описывают экспериментальные данные.

Полученная информация может быть полезна разработчикам технологий обработки дисперсных материалов в системах «газ–твёрдое».

Работа выполнена с использованием оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. М.: Химия, 1967, 664 с.
2. Куни Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. М.: Химия, 1976, 448 с.
3. Geldart D. Gas Fluidization Technology. Chichester: John Wiley, 1986, 316 p.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.

4. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972, 343 с.

5. Варсанюфьев В.Д., Кольман-Иванов Э.Э. Вибрационная техника в химической промышленности. М.: Химия, 1985, 240 с.

6. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983, 192 с.

7. Бокун И.А. Исследование гидродинамики и теплообмена пульсирующего слоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1967, 15 с.

8. Локшин Ю.Х. Исследование импульсного псевдооживления и определение рациональных режимов работы аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1977, 19 с.

9. Островский Г.М., Аксёнова Е.Г. Псевдооживление порошкообразных материалов при колебательном изменении давления газа // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 31. № 1. С. 5–10.

10. Alfredson P.G. Behavior of pulsed fluidized beds – Part I: Bed expansion // Trans. Inst. Chem. Engrs. 1973. v. 51. p. 232–241.

11. Alfredson P.G. Behavior of pulsed fluidized beds – Part II: Bed contraction // Trans. Inst. Chem. Engrs. 1973. v. 51. p. 242–246.

12. Бурбелло А.Т., Шабров А.В., Денисенко П.П. Современные лекарственные средства: клинико-фармакологический справочник практического врача. М.: ОЛМА Медиа Групп, 2006, 896 с.

13. Балахнина А.В. Применение техники пульсирующего слоя для совершенствования процесса сушки кристаллического нитрата натрия в производстве угленита Э–6: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск, 2011, 19 с.

Информация об авторах

М. С. Васильшин – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. В. Балахнина – кандидат технических наук, доцент, декан факультета Бийского технологического института (филиала) АлтГТУ.

О. С. Иванов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. Г. Карпов – научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

А. А. Антонникова – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.

Information about the authors

M.S. Vasilishin - doctor of technical sciences, associate professor, main research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.V. Balakhnina - candidate of technical sciences, associate professor, chief of faculty of the Byisk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University.

O.S. Ivanov - candidate of technical sciences, senior research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.G. Karpov - research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.

A.A. Antonnikova - candidate of physical-mathematical sciences, research scientist of the Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of SB RAS.