

Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 66.096.5

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.033

 EDN: SECAIJ

## ИССЛЕДОВАНИЕ УНОСА ПЕНТАЭРИТРИТА ПРИ ЕГО ИМПУЛЬСНОМ ПСЕВДООЖИЖЕНИИ

Михаил Степанович Василишин <sup>1</sup>, Анатолий Геннадьевич Карпов <sup>2</sup>,  
Олег Сергеевич Иванов <sup>3</sup>, Сергей Сергеевич Титов <sup>4</sup>,  
Александра Александровна Антонникова <sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> [osi85@mail.ru](mailto:osi85@mail.ru)

**Аннотация.** Выполнена экспериментальная оценка влияния некоторых технологических параметров импульсного псевдоожигения слоя пентаэритрита на его унос из рабочей камеры аппарата. Приводится описание лабораторной установки и методика проведения опытов. С применением инструментальных методов определен дисперсный состав пентаэритрита, подвергаемого псевдоожигению. Оценена возможность выноса «мелких» фракций материала из рабочей камеры. Показано, что унос материала возрастает пропорционально увеличению скорости ожигающего агента (воздуха). Увеличение частоты пульсации воздуха приводит к значительному снижению уноса. Установлен факт снижения уноса при уменьшении первоначальной высоты слоя материала в рабочей камере. Получена эмпирическая зависимость для расчёта константы скорости уноса. Приводится уравнение для расчёта кинетики процесса. Констатируется удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчётных данных по уносу пентаэритрита из пульсирующего слоя. Полученная информация может быть полезной разработчикам технологий обработки дисперсных материалов в системах «газ–твёрдое».

**Ключевые слова:** пентаэритрит, импульсное псевдоожигение, унос материала.

**Для цитирования:** Исследование уноса пентаэритрита при его импульсном псевдоожигении / М. С. Василишин [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 189–192. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.033. EDN: <https://elibrary.ru/SECAIJ>.

Original article

## RESEARCH OF PENTHAERITRITH ABLATION AT ITS PULSING FLUIDIZATION

Mikhail S. Vasilishin <sup>1</sup>, Anatoly G. Karpov <sup>2</sup>, Oleg S. Ivanov <sup>3</sup>,  
Sergey S. Titov <sup>4</sup>, Alexandra A. Antonnikova <sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Institute for Problems Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russia

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> [osi85@mail.ru](mailto:osi85@mail.ru)

**Abstract.** The experimental estimation of agency of some technological parameters of pulsing fluidization of a pentaerithrith layer on its ablation from the working chamber of the apparatus is executed. The description of the laboratory-scale plant and a technique of conducting experiences is resulted. With application of the instrumental methods the disperse composition of pentaerithrith, subjected to fluidization is defined. Removal possibility of "small" fractions of a material from the working chamber is sized up. It is shown, that material ablation increases proportionally to increase in speed of fluidization agent (air). The increase in a ripple frequency of air leads to considerable decrease in ablation. It's established fact of decrease in ablation at decrease of initial altitude of a material layer in the working chamber. Empirical dependence for calculation of a constant of ablation speed is gained. The equation for calculation of process kinetics is resulted. Satisfactory convergence experimental and design data on pentaerithrith ablation from a pulsing layer is ascertained. The gained information can be useful to development engineers of production engineering of processing of disperse materials in systems "gas-solid".

**Keywords:** pentaerithrith, pulsing fluidization, material ablation.

**For citation:** Vasilishin, M.S., Karpov, A.G., Ivanov, O.S., Titov, S.S. & Antonnikova, A.A. (2025). Research of pentaerithrith ablation at its pulsing fluidization. Polzunovskiy vestnik, (3), 189-192. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.033. EDN: <https://elibrary.ru/SECAIJ>.

### ВВЕДЕНИЕ

Функционирование технологической аппаратуры с псевдоожигенным (кипящим) слоем неизбежно связано с уносом определённой части обрабатываемого

материала и соответствующим увеличением нагрузки на пылеулавливающее оборудование.

Фактором, влияющим на величину уноса, является положительная разность между рабочей скоростью фильтрации газовой фазы и скоростью витания

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

наиболее мелких фракций дисперсного материала [1, 2]. Чем выше эта разность, тем большее количество мелких фракций может быть потенциально выведено из аппарата с потоком оживающего агента.

Вместе с тем, рядом исследований показано [3, 4], что значительное снижение уноса достигается при обработке полидисперсных продуктов в режиме импульсного псевдоожива. В этом случае устойчивое протекание процесса (без каналообразования и застойных зон на газораспределительной решётке аппарата) наблюдается при скорости оживающего агента на 15–20 % меньше, чем при его стационарной подаче, что способствует снижению уноса.

Изучение явления уноса частиц в процессе псевдоожива необходимо как для обоснованного расчёта пылеулавливающего оборудования, так и для оценки возможных потерь дисперсного материала при его обработке. Имеющиеся в литературе сведения по изучению уноса из аппаратуры с пульсирующим слоем носят, в основном, описательный характер и не содержат информации по прогнозу этого параметра, а также влиянию на него режимов обработки дисперсного материала.

Целью настоящей статьи является экспериментальная оценка влияния режимов импульсного псевдоожива слоя пентаэритрита на его унос из технологической аппаратуры.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Пентаэритрит является крупнотоннажным химическим продуктом, находящим применение в производстве алкидных смол, пентафталевых лаков и эмалей, синтетических смазочных масел, а также взрывчатых веществ [5].

Изучение закономерностей уноса пентаэритрита при его импульсном псевдоожива проводили на установке, схема которой представлена на рисунке 1.

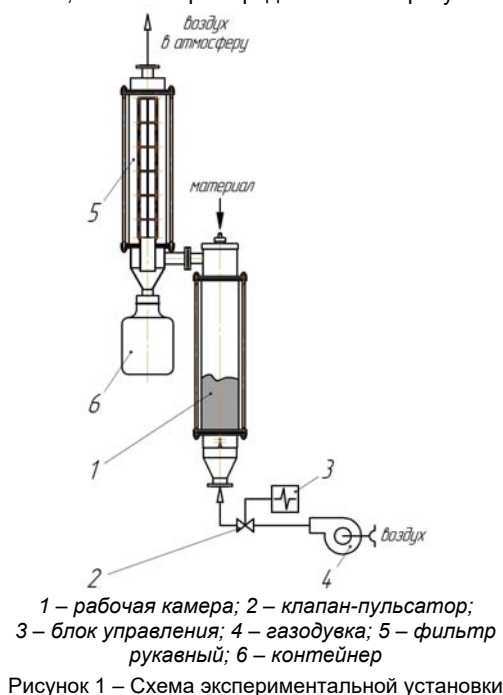


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

1 – working chamber; 2 – pulsator valve; 3 – control unit;  
4 – gas blower; 5 – filtersleeve type; 6 – container

Figure 1 – Experimental setup diagram

Исследуемый материал псевдооживался потоком воздуха в рабочей камере 1, выполненной из кварцевого стекла. Внутренний диаметр камеры  $D = 0,1$  м, а её высота  $H = 0,46$  м. Пульсирующая подача воздуха с заданной частотой при скважности импульса  $\psi = 0,5$  обеспечивалась электромеханическим клапаном-пульсатором 2 роторного типа, управляемым от электронного блока 3. Расход воздуха на псевдоожива материала регулировали изменением числа оборотов электродвигателя газодувки 4 на напорном трубопроводе установки. Отрабатанный воздух очищался в рукавном фильтре 5, а уносимый материал собирался в съёмном контейнере 6.

В экспериментах использовался пентаэритрит технический, выпускаемый по ГОСТ9286-2012. Влажность материала определялась с помощью анализатора MB-23 и не превышала 0,1 %. Массу пентаэритрита, загружаемого в рабочую камеру, а также выгружаемого из контейнера уноса оценивали с помощью аналитических весов KERN572-33. Фракционный состав материала определяли оптическим анализатором размеров частиц PIP9.1. Для замера скорости воздуха использовался термоанемометр TESTO-425.

Изучали влияние режимов импульсного псевдоожива пентаэритрита на его унос из рабочей камеры. Пульсирующую подачу воздуха осуществляли с частотой  $f = 0,5–5,0$  Гц при высоте неподвижного слоя материала  $H_{сл} = 0,05–0,1$  м. Скорость воздуха изменялась в диапазоне  $w_n = 0,025–0,1$  м/с. Физические параметры воздуха принимались соответствующими температуре 20 °С.

В рабочую камеру загружали навеску пентаэритрита, после чего материал подвергался псевдоожива в определённом гидродинамическом режиме и оценивалось его количество, собираемое в съёмном контейнере установки после окончания эксперимента. Длительность обработки составляла  $t = 1800$  с. Величину уноса материала оценивали в процентах от массы навески в рабочей камере.

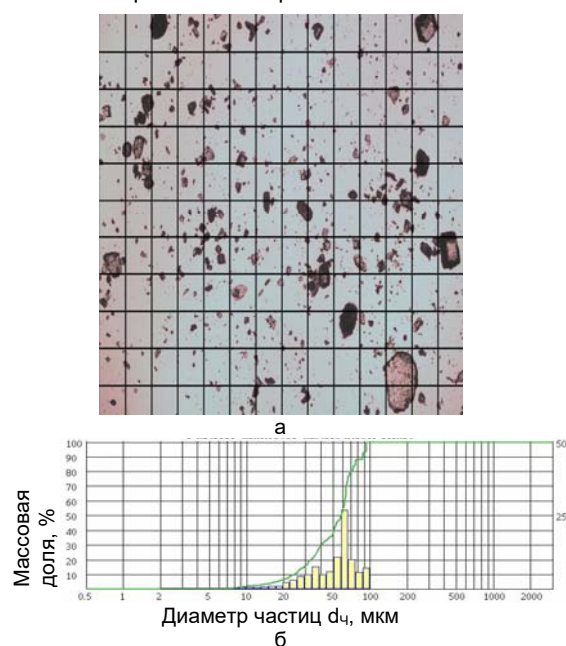


Рисунок 2 – Микрофотография частиц пентаэритрита (x400) и кривые их распределения по размерам

Figure 2 – Micrograph of pentaerythrit particles (x400) and their size distribution curves

На рисунке 2 а, б представлены микрофотографии частиц пентаэритрита и кривые их распределения по размерам. Анализ дисперсного состава материала показывает, что деловая фракция с размером частиц  $(35,0-90,0) \cdot 10^{-6}$  м составляет около 80 % по массе. На долю «мелкой» фракции  $(7,5-16,0) \cdot 10^{-6}$  м приходится до 7 % от общей массы материала. Часть этой фракции потенциально может быть вынесена из слоя, если скорость воздуха превысит скорость витания «мелких» частиц.

Как и ожидалось, наибольшее влияние на унос пентаэритрита оказывает скорость воздуха. Её увеличение (рисунок 3) вызывало пропорциональное возрастание уноса, причём в области низких частот пульсации эта тенденция более ярко выражена, чем при 4,0–5,0 Гц. С увеличением  $w_{\Pi}$  заметно возрастал размер и количество образующихся в слое пузырей, которые, в свою очередь, способствовали увеличению высоты локальных выбросов материала в сепарационное пространство рабочей камеры.

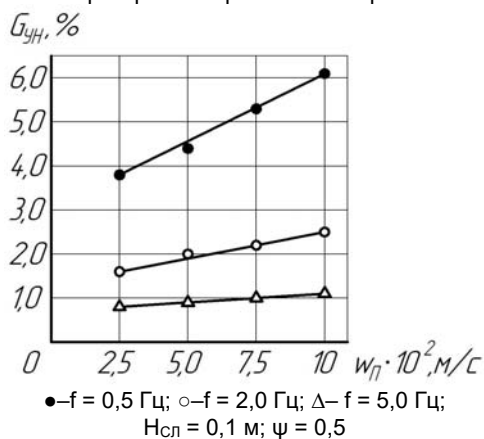


Рисунок 3 – Влияние скорости воздуха ( $w_{\Pi}$ ) на величину уноса ( $G_{UN}$ ) пентаэритрита из слоя

Figure 3 – Effect of air velocity ( $w_P$ ) on the amount of pentaerythritol entrainment from the layer

Следует отметить и тот факт, что при частотах пульсации 0,5–1,0 Гц расширение слоя было максимальным, в то время как в диапазоне частот 3,0–5,0 Гц слой заметно уплотнялся, что снижало высоту локальных выбросов материала из слоя и, соответственно, величину уноса.

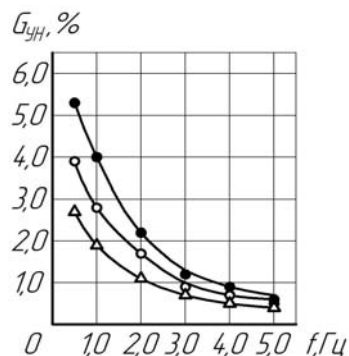
В ряде работ [6–8] показано, что целенаправленное изменение частоты прерывания потока воздуха способно оказывать эффективное воздействие на характер перемешивания материала в слое, а также и на его структуру. Как следует из рисунка 4, при одинаковых значениях  $w_{\Pi}$  величина уноса пентаэритрита с увеличением частоты пульсации заметно снижается и при  $f = 4,0-5,0$  Гц достигает минимальных значений.

Полученные данные свидетельствуют о снижении уноса пентаэритрита с уменьшением первоначальной высоты слоя, причём в области частот пульсации 0,5–2,0 Гц оно более заметно, чем при 3,0–5,0 Гц. Снижение уноса может быть объяснено более однородной структурой слоя, имеющей место при таких режимах обработки, а также улучшением газораспределения на решётке рабочей камеры аппарата при повышенной частоте пульсации.

Величину уноса пентаэритрита оценивали с использованием уравнения кинетики, предложенного в [9]:

$$G_{UN} = G_{O0} (1 - \exp(-kt)) / (1 - c_0 \exp(-kt)), \quad (1)$$

где  $G_0$  – масса исходного материала в слое, кг;  $c_0$  – начальная концентрация «мелочи» в слое, доли от 1;  $k$  – константа скорости уноса,  $c^{-1}$ .



$\Delta - H_{C\Gamma} = 0,05$  м;  $\circ - H_{C\Gamma} = 0,075$  м;  $\bullet - H_0 = 0,1$  м;  
 $w_{\Pi} = 0,075$  м/с;  $\psi = 0,5$

Рисунок 4 – Влияние частоты пульсации ( $f$ ) воздуха на величину уноса ( $G_{UN}$ ) пентаэритрита из слоя

Figure 4 – Influence of the pulsation frequency ( $f$ ) of air on the amount of pentaerythritol entrainment ( $G_{UN}$ ) from the layer

При обработке экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость для расчёта  $k$ :

$$k = 6,2 \cdot 10^{-4} Fr^{0,23} (0,65 \cdot 10^{-3} / Sth)^{1,5} (H_{C\Gamma} / D)^{-0,64}, \quad (2)$$

где  $Fr = w_{\Pi}^2 / (g d')$  – критерий Фруда;  $Sth = d_{cf} / w_{\Pi}$  – модифицированный критерий Струхала.

Уравнение (2) справедливо при соблюдении следующих ограничительных условий:

$$0,42 \leq Fr \leq 6,66; 0,27 \leq Sth \leq 10,6; 0,5 \leq H_{C\Gamma} / D \leq 1,0.$$

В состав критерия Фруда входит величина  $d'$ , которая устанавливает предельный диаметр частиц пентаэритрита, уносимых из слоя. Согласно [1], она рассчитывается по зависимости:

$$d' = 4,243 (w_{\Pi} \cdot \mu / \rho_{ТВ})^{0,5}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $\rho_{ТВ}$  – плотность частиц твёрдой фазы,  $кг/м^3$  (для пентаэритрита принимали  $\rho_{ТВ} = 1394$   $кг/м^3$ ).

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по уравнениям (1)–(3) данных по уносу материала из пульсирующего слоя показывает, что погрешность вычислений не превышала 12–15 %, т.е. они могут использоваться при проведении оценочных расчётов технологического процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние технологических параметров импульсного псевдооживления на унос пентаэритрита из рабочей камеры аппарата. В результате обработки экспериментальных данных предложена эмпирическая зависимость для расчёта константы скорости процесса. Отмечена удовлетворительная сходимость расчётных и экспериментальных данных по уносу материала. Полученная информация может быть полезна проектировщикам 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. Азров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968, 512 с.

3. Бокун И.А., Забродский С.С., Юдицкий В.И. Влияние пульсации газового потока на унос зернистого материала из пульсирующего слоя // Исследование процессов переноса в аппаратах с дисперсными системами. Минск : Наука и техника, 1969, С. 8–11.

4. Алексеев А.Д., Андриянов П.А. Влияние нестационарности газового потока на процессы в псевдоожиженном слое и особенности их аппаратного оформления // Химическое и нефтяное машиностроение. 1970. № 10. С. 27–28.

5. ГОСТ 9286–2012. Пентаэритрит технический. Технические условия : введ. 2013-08-01. Москва, 2013, 19 с.

6. Kobayashi M., Ramaswami D., Brazelton W.T. Pulsed bed approach to fluidization // Chemical Engineering Progress Symposium Series. 1970. v. 66. № 105. p. 47–57.

7. Wong H.W., Baird M.H.I. Fluidization in a pulsed gas flow // Chemical Engineering Journal. 1971. № 2. p. 104–113.

8. Аксёнова Е.Г. Перспективы применения пульсационных резонансных воздействий в технологических процессах с порошкообразными средами // Химическая промышленность. 2004. Т. 81. № 8. С. 381–393.

9. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем : Гидравлические и тепловые основы работы. Л. : Химия, 1981, 296 с.

#### **Информация об авторах**

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

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

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

*С. С. Титов – кандидат технических наук, и.о. директора Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН.*

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

#### **REFERENCES**

1. Gelperin, N.I., Einstein, V.G., Kvasha, V.B. (1967). Fundamentals of fluidization technology. Moscow: Khimiya, 664 p. (In Russ.).

2. Aerov, M.E., Todes, O.M. (1968). Hydraulic and thermal fundamentals of operation of stationary and fluidized granular bed apparatuses. L. : Khimiya, 512 p. (In Russ.).

3. Bokun, I.A., Zabrodsky, S.S., Yuditsky, V.I. (1969). Influence of gas flow pulsation on the removal of granular material from the pulsating layer. Investigation of transfer processes in apparatuses with dispersed systems. Minsk : Science and Technology, pp. 8–11. (In Russ.).

4. Alekseev, A.D., Andrianov, P.A. (1970). The influence of the instability of the gas flow on the processes in the fluidized bed and the features of their installation design // Chemical and petroleum engineering. No. 10. pp. 27–28. (In Russ.).

5. HOST 9286-2012. (2013). Technical pentaerythritol. Technical specifications: introduced 2013-08-01. Moscow, 2013, 19 p. (In Russ.).

6. Kobayashi, M., Ramaswami, D., Brazelton, W.T. (1970). Pulsed bed approach to fluidization. Chemical Engineering Progress Symposium Series. v. 66. No. 105. p. 47–57. (In Russ.).

7. Wong, H.W., Baird, M.H.I. (1971). Fluidization in a pulsed gas flow. Chemical Engineering Journal. No. 2. pp. 104–113. (In Russ.).

8. Aksanova, E.G. (2004). Prospects for the application of pulsation resonance effects in technological processes with powdered media. Chemical industry. vol. 81. No. 8. pp. 381–393. (In Russ.).

9. Todes, O.M., Cytovich, O.B. (1981). Devices with a boiling granular layer: Hydraulic and thermal fundamentals of operation. L. : Khimiya, 296 p. (In Russ.).

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

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

*S.S. Titov - candidate of technical sciences, fulfilling duties of the director in 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.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 19 декабря 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.*

*The article was received by the editorial board on 19 Dec 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.*