

Исследование температурных полей теплоносителя в установках получения 3D наноструктурированного пористого поверхностного слоя на гранулах аммиачной селитры

А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский

Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

(Получено 20.12.2016; опубликовано online 20.02.2017)

Статья посвящена изучению влияния термодинамических показателей работы гранулятора и интенсивности направленного вихревого движения теплоносителя на структуру и качество пористого поверхностного слоя гранул аммиачной селитры. Получено поле температур теплоносителя во времени в вихревом грануляторе. Представлены результаты изучения поля температур теплоносителя при изменении его окружной скорости (степени закрутки). Изучена поверхностная структура гранулы, полученная в вихревом газовом потоке с различной интенсивностью закрутки. Полученные данные являются основой для создания методики инженерного расчёта вихревых грануляторов в составе установок получения 3-D наноструктурного пористого поверхностного слоя на грануле аммиачной селитры.

Ключевые слова: 3D наноструктурированный пористый слой, Вихревой гранулятор, Гидродинамика, Термодинамика

DOI: [10.21272/jnep.9\(1\).01015](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01015)

PACS numbers: 89.20.Bb, 89.20.Kk

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение аммиачной селитры с развитой пористой поверхностью значительно повышает качество промышленных взрывчатых веществ, применяемых в горнорудной промышленности [1-3].

Одним из путей повышения эффективности ПБВ на основе аммиачной селитры является искусственное увеличение объёма ее пор различными способами. В работе [4] одним из наиболее перспективных методов признан способ, включающий комбинацию увлажнения и термообработки рядовой пористой аммиачной селитры в малогабаритных вихревых грануляторах. Системы с вихревыми потоками зарекомендовали себя как достаточно эффективные в различных тепломассообменных процессах [5-8]. Теоретическому описанию и экспериментальному исследованию отдельных аспектов гранулирования в вихревых грануляторах посвящён ряд работ, в которых описаны гидродинамика движения потоков [9, 10], процессы классификации и сепарации гранул [11], экологические аспекты разработки блока утилизационных модулей для отходов производства и гидродинамические условия получения ПАС [12, 13].

В настоящее время ведётся поиск оптимальных гидродинамических условий получения пористого поверхностного слоя на гранулах аммиачной селитры. Следует отметить, что из всех гидродинамических характеристик интенсивность направленного вихревого движения теплоносителя оказывает наиболее существенное влияние на формирование стабильного псевдооживленного слоя и время пребывания гранул в аппарате [14, 15]. В то же время, комплексное изучение влияния степени закрутки потока на поле температур теплоносителя в рабочем пространстве вихревого гранулятора осуществлено не было. Результаты подобных исследований в применении к другим процессам представлены в работах [16-18], но они не позволяют с достаточной

точностью описать исследуемый в этой работе процесс вследствие различия механизмов передачи тепла и массы.

Исследование комплексного воздействия интенсивности направленного вихревого движения теплоносителя и термодинамического режима работы вихревого гранулятора на структуру пористого поверхностного слоя, поиск оптимального значения этих показателей для осуществления процесса получения наноструктурированного пористого поверхностного слоя определяют актуальность и основную цель данной работы.

2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований, изложенные в [19], посвящены изучению кинетики прогрева гранулы и удаления влаги из неё, а также влиянию термодинамических характеристик теплоносителя на структуру пористого поверхностного слоя на грануле аммиачной селитры.

Основными задачами работы являются: исследование влияния интенсивности направленного вихревого движения теплоносителя на его термодинамические характеристики в рабочем пространстве вихревого гранулятора; исследование структуры пористого поверхностного слоя, полученного в различных термодинамических условиях при различной степени интенсивности вихревого движения теплоносителя.

В соответствии с поставленными задачами экспериментальных исследований в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Процессы и оборудование химических и нефтеперерабатывающих производств» Сумского государственного университета сконструирована экспериментальная установка, устройство которой приведено на рис. 1. В зависимости от интенсивности

направленного вихревого движения теплоносителя прогревание отдельных зон рабочего пространства вихревого гранулятора происходит с разной интенсивностью.

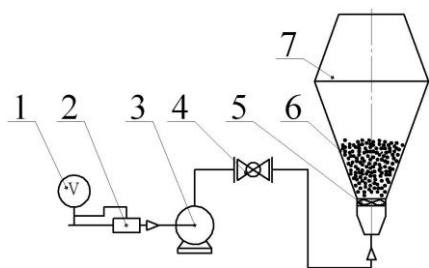


Рис. 1 – Установка для исследования влияния степени закрутки газового потока на термодинамические характеристики получения пористого поверхностного слоя: 1 – вольтметр; 2 – реостат; 3 – вентилятор; 4 – вентиль; 5 – газораспределительное устройство; 6 – коническая секция (диффузор); 7 – коническая секция (конфузор)

Оценить распределение температуры теплоносителя в вертикальных и горизонтальных сечениях вихревого гранулятора становится возможным с помощью тепловизионных исследований. Результаты этих исследований позволяют определить минимальную, максимальную и среднюю температуру теплоносителя, а также температуру теплоносителя в центре гранулятора в определенный промежуток времени в условиях присутствия или отсутствия гранул. Такой подход позволяет отработать алгоритм управления прогревом и обезвоживанием гранулы и с достаточной степенью точности получить исходные данные для кинетического расчета этих процессов.

Приборы и оборудование: определение гидродинамических характеристик движения потоков (термоанемометр TES-1340); измерение температуры в калорифере (термопара ТС10-С; потенциометр регистрирующий самопишущий КСП-3); измерение температуры в рабочем пространстве гранулятора (тепловизор Fluke Ti25, пирометр Victor 305B); измерение влажности гранул и воздуха (мультиметр DT-838); исследование микроструктуры гранул (микроскоп KONUSPIX-450X KONUS, растровый электронный микроскоп РЭМ-100У и рентгеновский спектрометр с дисперсией по энергии).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В объёме гранулятора можно выделить несколько зон движения теплоносителя с различным температурным потенциалом. Зона I характеризуется максимальной температурой теплоносителя и является «активной» зоной. В этой зоне на начальном этапе формирования пористого слоя происходит интенсивное удаление влаги с поверхности при максимальной степени закрутки теплоносителя. Зона II является основной рабочей зоной вихревого гранулятора. В ней при оптимальной температуре (достаточной для удаления влаги и сохранения целостности ядра гранулы) удаляется влага из внутренних слоёв гранул. В этой зоне теплоноситель совершает комбинированное движение (закрутка и восходящий поток), что

способствует уменьшению степени турбулизации потока, столкновения гранул друг с другом и со стенкой аппарата. В зоне III в восходящем потоке теплоносителя осуществляется сепарация мелких гранул. Здесь теплоноситель характеризуется минимальной температурой и выполняет лишь «гидродинамическую» роль – обеспечивает разделение гранул на фракции. При увеличении интенсивности направленного вихревого движения газового потока высота зоны I увеличивается и в грануляторе происходит выравнивание поля температур.

Результаты экспериментальных исследований показали следующее:

- изменение температурного поля в рабочем пространстве вихревого гранулятора во времени характеризуется двумя экстремумами (момент введения гранул в поток горячего теплоносителя и момент начала одновременного нагрева гранул и горячего теплоносителя);

- прогрев рабочего пространства вихревого гранулятора при выходе на рабочий режим осуществляется неравномерно с характерными зонами пониженной температуры (с течением времени прогрев становится более равномерным);

- при увеличении степени закрутки повышается средняя температура оживающего агента и его температура в центре аппарата;

- в вертикальных сечениях аппарата в нижних слоях оживающего агента (после введения гранул - двухфазной системы) несколько уменьшается температура в центральной области. Это можно объяснить наличием интенсивного вихревого движения оживающего агента (двухфазной системы) в этой зоне;

- в горизонтальных сечениях аппарата наблюдается некоторое повышение температуры оживающего агента (после введения гранул - двухфазной системы) вследствие интенсивной закрутки потоков;

- после загрузки гранул температура в зоне движения гранул резко падает, интенсивность дальнейшего прогрева гранулятора также снижается.

Результаты экспериментальных исследований позволяют определить температуру теплоносителя в рабочем пространстве вихревого гранулятора в определенный промежуток времени и применить этот показатель для расчета кинетики прогрева и обезвоживания гранулы. Уточнение показателя температуры теплоносителя в грануляторе позволяет провести расчеты с определением минимального времени сушки гранулы, чтобы избежать нежелательного ее перегрева и разрушения ядра [20, 21]. В дальнейшем по результатам гидродинамического расчета и оценки условий тесного движения гранул необходимо определить оптимальную конструкцию рабочего пространства гранулятора.

По результатам общего анализа картины распределения поля температур теплоносителя предложено два способа сушки гранул: одновременно с нагреванием горячего теплоносителя; периодическим вводом для сушки после полного нагрева горячего теплоносителя и последующим нагреванием [22, 23]. В первом случае прогрев будет «мягким» (постепенный

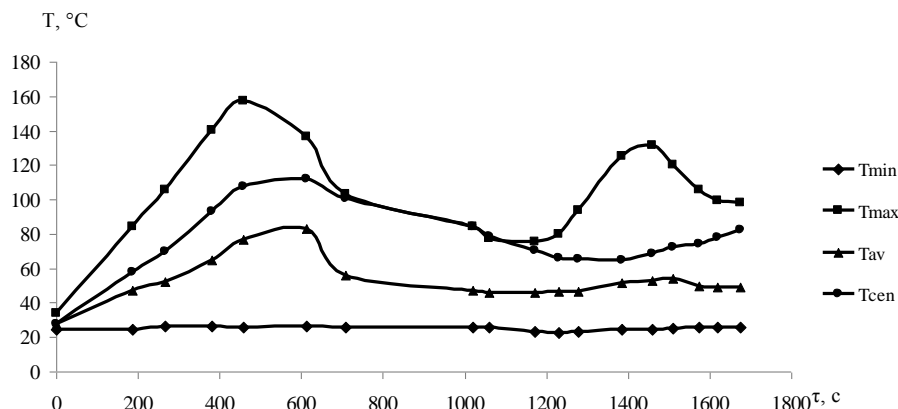


Рис. 2 – Динамика изменения температуры теплоносителя вихревого гранулятора во времени τ в зависимости от интенсивности направленного вихревого движения теплоносителя при окружающей составляющей скорости движения теплоносителя $V_{\varphi} = 8,1$ м/с. Время ввода гранул – 650 с.; T_{min} – минимальная температура теплоносителя; T_{max} – максимальная температура теплоносителя; T_{av} – средняя температура теплоносителя; T_{cen} – температура теплоносителя в центре аппарата.

прогрев гранулы увеличивает время ее сушки, но предохраняет от разрушения ядра). Результаты экспериментов показали, что такой способ приводит к образованию наноструктурированного пористого слоя на поверхности гранулы. Во втором случае интенсивность удаления влаги увеличивается (резкий нагрев позволяет уменьшить время прогрева гранулы, увеличить интенсивность удаления влаги), но при этом возможно разрушение ядра. Подбор оптимального термодинамического режима работы гранулятора позволит провести полное удаление влаги из гранулы с сохранением ей прочности и образованием пористого поверхностного слоя. В связи с этим использовался метод сушки при условии обеспечения необходимой прочности гранул (нормативное значение – 0,4 кг/гранулу).

В таблице 1 приведены результаты исследования качества образцов и его пористой поверхности. Структура поверхности образцов приведена на рис. 3.

Таблица 1 – Результаты исследования качества образцов и его пористой поверхности

Интенсивность направленного вихревого движения теплоносителя V_{φ} , м/с	Общая характеристика поверхности	Твёрдость образца, кг/гранулу
5,2	Преимущественно непористая поверхность с некоторым количеством поверхностных пор	0,45
6,8	Поверхностные поры	0,43
8,1	Глубокие поры	0,41

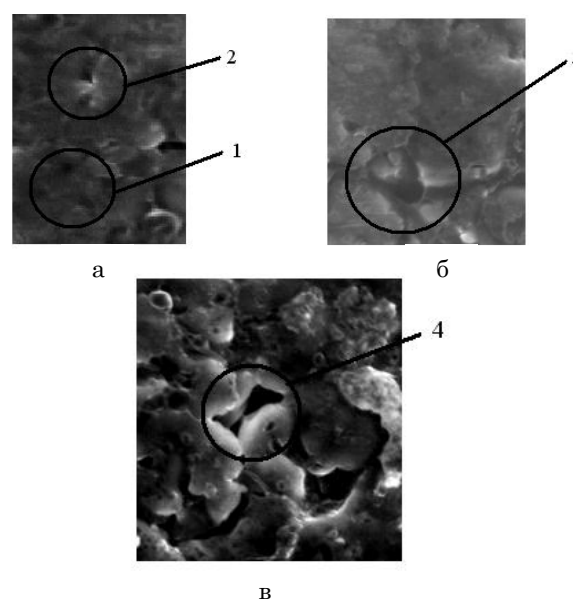


Рис. 3 – Характерная структура пористого поверхностного слоя при различных термодинамических условиях его получения ($\times 850$): а – $V_{\varphi} = 5,2$ м/с; б – $V_{\varphi} = 6,8$ м/с; в – $V_{\varphi} = 8,1$ м/с; 1 – участки с отсутствием пор; 2 – участки с редко встречающимися поверхностными порами; 3 – участки с редко встречающимися глубокими порами; 4 – участки с глубокими порами

Полученные результаты позволяют оценить интенсивность прогрева рабочего пространства гранулятора в различных зонах. Данные экспериментов являются основой оптимизационного подбора метода увлажнения гранул (место ввода гранул в гранулятор, метод увлажнения и т.д.). Среди дальнейших направлений исследований – изучение фазового состава и кристаллической структуры образцов, полученных в различных условиях, а также разработка технологических основ получения пористого поверхностного слоя.

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 0116U006812.

Investigation of the Temperature Field of Coolant in the Installations for Obtaining 3D Nanostructured Porous Surface Layer on the Granules of Ammonium Nitrate

A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskiy

Sumy State University, 2, Rymskogo-Korsakovas st., 40007 Sumy, Ukraine

The paper is devoted to the study of thermodynamic indicators of the granulator's work and intensity of directed vortex motion of heat transfer agent influence on structure and quality of porous surface layer of ammonium nitrate granules. Field heat transfer agent temperature in time in vortex granulator was obtained. The results of heat transfer agent temperatures fields at different its circumferential speed (spin degree) study are presented. The surface structure granules obtained in the vortex gas flow with different spins intensities was studied. The obtained findings are base for vortex granulators engineering calculation technique development in the composition of devices for producing of 3-D nanostructured porous surface layer on ammonium nitrate granule.

Keywords: 3D nanostructured porous layer, Vortex granulator, Thermodynamics, Hydrodynamics.

Дослідження температурних полів теплоносія в установках отримання 3D наноструктурованого пористого поверхневого шару на гранулах аміачної селітри

А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

Стаття присвячена вивченню впливу термодинамічних показників роботи гранулятора та інтенсивності направлено вихрового руху теплоносія на структуру і якість пористого поверхневого шару гранул аміачної селітри. Отримано поле температур теплоносія в часі в вихровому грануляторі. Представлені результати вивчення поля температур теплоносія при зміні його колової швидкості (ступеню закрутки). Вивчено поверхневу структуру гранули, що отримана в вихровому газовому потоці з різною інтенсивністю закрутки. Отримані дані є основою для створення методики інженерного розрахунку вихрових грануляторів в складі установок отримання 3-D наноструктурного пористого поверхневого шару на гранулі аміачної селітри.

Ключові слова: 3D наноструктурований пористий шар, Вихровий гранулятор, Термодинаміка, Гідродинаміка.

REFERENCES

1. *Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils* (Ed. G.M. Erode) (Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co: 2013).
2. D. Buczkowski, *Cent. Eur. J. Energ. Mat.* **8** No 2, 99 (2011).
3. S.S. Verma, *Chem. Business* **22** (12), 33 (2008).
4. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskiy, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* **6**, 42 (2013).
5. Y. Caiyuan, Q. Tao, W. Xizhong, *Chin. J. Chem. Eng.* **16** No 6, 836 (2004).
6. R. Kaewklum, V.I. Kuprianov, *Fuel* **89**, 43 (2010).
7. A.A. Khalatov, *J. Eng. Phys. Thermophys.* **83** No 4, 808 (2010).
8. R.W. Ashcraft, G.J. Heynderickx, G.B. Marin, *Chem. Eng. J.* **207-208**, 195 (2012).
9. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskiy, *Chem. Chem. Technol.* **9** No 2, 175 (2015).
10. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskiy, *Chem. Chem. Technol.* **9** No 3, 337 (2015).
11. A.E. Artyukhov, A.S. Fursa, K.V. Moskalenko, *Chem. Petroleum Eng.* **51** No 5-6, 311 (2015).
12. A.E. Artyukhov, *Chem. Petroleum Eng.* **49** No 11-12, 736 (2014).
13. M.G. Prokopov, D.A. Levchenko, A.E. Artyukhov, *Appl. Mechan. Mater.* **630**, 109 (2014).
14. E.P. Volchikov, N.A. Dvornikov, V.V. Lukashov, R.Kh. Abdrakhmanov, *Thermophys. Aeromech.* **20** No 6, 663 (2013).
15. N.A. Dvornikov, P.P. Belousov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **52** No 2, 206 (2011).
16. S.A. Burtsev, A.I. Leont'ev, *High Temp.* **52** No 2, 297 (2014).
17. N. Voynov, N. Nikolaev, F. Kustod, A. Nikolaev, D. Tarovaty, *Chem. Plant Raw Mater.* **3**, 173 (2008).
18. P. Eliaers, J.R. Pati, S. Dutta, J. De Wilde, *Chem. Eng. Sci.* **123**, 648 (2015).
19. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskiy, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 4(2), 04083 (2016).
20. S.A. Nebra E, M.A. Silva, A.S. Mujumdar, *Dry. Technol.* **18**(3), 791 (2000).
21. B. Guignon, A. Duquenoy, *Dry. Technol.* **20**, 419 (2002).
22. A. Maranda, P. Košlik, J. Hadzik, Z. Wilk, *Chemik* **68** No 1, 9 (2014).
23. D. Buczkowski, *Cent. Eur. J. Energ. Mat.* **11** No 1, 115 (2014).