

Термодинамические условия 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 09.10.2016; в отредактированной форме – 20.12.2016; опубликовано online 23.12.2016)

Изучено влияние термодинамических условий на структуру наноструктурированного пористого поверхностного слоя на гранулах аммиачной селитры. На основании теоретической модели кинетики сушки и обезвоживания проведён расчёт прогрева гранулы и удаления влаги из неё при различных термодинамических показателях теплоносителя. Исследована структура поверхности гранул, которые получены при различных термодинамических характеристиках теплоносителя. Полученные данные являются основой для подбора оптимальных технологических параметров работы вихревых грануляторов в составе установок получения 3D наноструктурного пористого поверхностного слоя на грануле аммиачной селитры.

Ключевые слова: 3D Наноструктурированный пористый слой, Гранулятор, Термодинамика

DOI: [10.21272/jnep.8\(4\(2\)\).04083](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(2)).04083)

PACS numbers: 89.20.Bb, 89.20.Kk

1. ВВЕДЕНИЕ

Оценка качества пористой аммиачной селитры проводится по двум показателям: удерживающая и впитывающая способность по отношению к дизельному топливу [1]. Эти показатели наряду с твёрдостью гранул обеспечивают эффективность промышленных взрывчатых веществ [2].

Создание наноструктурированного пористого поверхностного слоя на гранулах аммиачной селитры может быть осуществлено несколькими методами [3]. Среди них метод увлажнения с последующей термообработкой в вихревом псевдооживленном слое выгодно отличается такими преимуществами:

- повышение экологических показателей производства;
- отсутствие потери прочности гранул;
- упрощённая схема производства.

Несмотря на кажущуюся простоту способа, он является очень чувствительным к гидродинамическим и термодинамическим условиям его проведения. Обеспечить управление процессом получения гранул возможно при использовании аппаратов вихревого типа [4-10], которые эффективно зарекомендовали себя во многих теплообменных процессах [11-16]. В работах [17-22] проведен выбор оптимальных гидродинамических условий работы вихревого гранулятора, при которых возможно получения продукта с достаточной прочностью и минимальной влажностью. В то же время, термодинамические показатели рабочего пространства вихревого гранулятора должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить равномерный прогрев гранулы и отведение влаги из неё [23]. Недогрев гранулы может привести к ухудшению структуры пористого поверхностного слоя, перегрев – в резкому испарению влаги из гранулы, интенсивному выходу кислорода и аммиака, что приведёт к образованию трещин и разрушению ядра гранулы.

Поиск оптимальных термодинамических условий получения наноструктурированного пористого поверхностного слоя определяют актуальность и основную цель данной работы.

2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными задачами первой части представленной работы являются:

- изучение кинетики прогрева гранулы и удаления влаги из неё;
- исследование структуры пористого поверхностного слоя, полученного в различных термодинамических условиях.

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 основу расчёта кинетики прогрева гранулы и удаления влаги из неё положена математическая модель [24]. Эта модель позволяет получить данные о прогреве гранулы по радиусу и относительной массе гранулы (определяемой количеством удалённой влаги из неё) в заданный промежуток времени.

Приборы и оборудование:

- определение гидродинамических характеристик движения потоков – термоанемометр TES-1340;
- измерение температуры в калорифере - термopара TC10-C; 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.

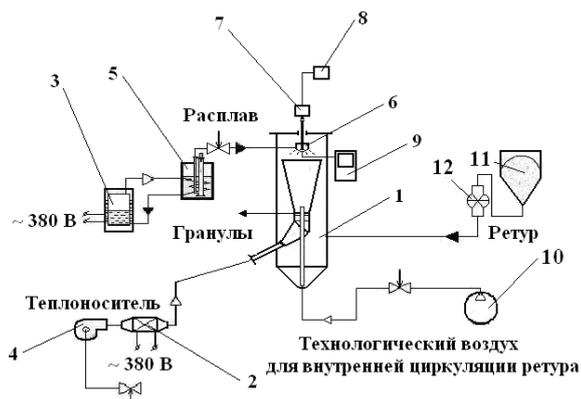


Рис. 1 – Установка исследования термодинамических условий получения наноструктурированного пористого поверхностного слоя на гранулах: 1 – вихревой гранулятор; 2 – электрокалорифер; 3 – парогенератор; 4 – газодувки; 5 – емкость с углубленным насосом 6 – распылитель; 7 – электромагнитный вибратор; 8 – электронный регулятор; 9 – частотомер; 10 – компрессор; 11 – бункер; 12 – сегментный дозатор

Условные обозначения:

- T_c – температура теплоносителя, °С;
- T_0 – начальная температура гранулы, °С;
- r – радиус гранулы, м (мм);
- d – диаметр гранулы, м (мм);
- $U_{нач}$, $U_{кон}$ – начальное и конечное влагосодержание соответственно, кг влаги/кг материала;
- τ – время, с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены типичные результаты расчета кинетики изменения температуры гранулы по диаметру ($d = 1-3$ мм) в определенный промежуток времени и температуры гранулы в заданном временном диапазоне ($\tau = 2-6$ с).

Гранулы разного диаметра прогреваются с разной интенсивностью, что дает основания к определению общего времени прогрева гранул в полидисперсной системе на уровне максимального времени прогрева для гранулы наибольшего диаметра. Несмотря на то, что, как показали результаты экспериментальных исследований, в нижней части вихревого гранулятора распределение влажных гранул по размеру должен нечеткий характер, равномерный прогрев всей полидисперсной системы возможен только при соблюдении указанного выше времени.

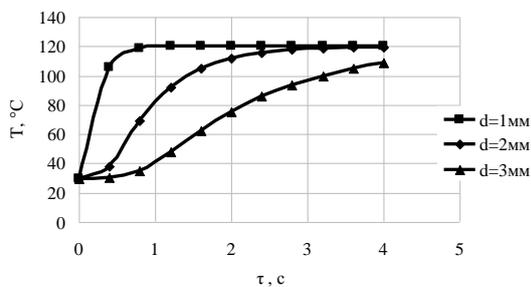


Рис. 2 – Кинетика прогрева гранулы аммиачной селитры по радиусу при $T_c = 120$ °С, $T_0 = 30$ °С и $\tau = 4$ с

Представленные расчеты справедливы для теплоносителя с постоянной температурой и не учитывают влияние температуры гранул (например, при введении ретура) и жидкой фазы (увлажняющего агента), которые вводятся в аппарат, на изменение температуры теплоносителя. Таким образом, гранула будет прогреваться вместе с теплоносителем до определенной температуры, и лишь потом начнется интенсивное удаление влаги. Этот фактор увеличивает общее необходимое время пребывания гранул в аппарате. Расчеты по математической модели показали, что для полного прогрева гранулы с $d = 2$ мм от температуры 20 °С до 120 °С в потоке теплоносителя с температурой до 120° необходимо 8 секунд. Если проводить ступенчатый расчет с учетом того, что теплоноситель при введении гранул или увлажнения охлаждается, то постепенный прогрев гранулы до температуры 120° будет занимать промежуток времени в 3-3,5 раза больше, чем в предыдущем случае. Результаты экспериментальных исследований кинетики прогрева рабочего пространства вихревого гранулятора при различных условиях, которые будут приведены во второй части представленной работы, является основой для определения температуры теплоносителя при постепенном прогреве гранулы одновременно с потоком теплоносителя.

На рис. 3 показана кинетика изменения относительной массы гранулы аммиачной селитры различного диаметра при различных условиях увлажнения и требований к влагосодержанию конечного продукта. Следует отметить, что в первом периоде сушки с постоянной скоростью в зоне интенсивного вихревого движения гранул удаляется до 60 % необходимой влаги. Количество оставшейся влаги последовательно удаляется преимущественно в зоне комбинированного восходящего и вихревого движения гранул. В третьей зоне – преимущественного восходящего движения – влага удаляется незначительно, что подтверждено результатами экспериментальных исследований влияния степени закрутки газового потока на относительную интенсивность удаления влаги из гранулы, которые будут приведены во второй части работы.

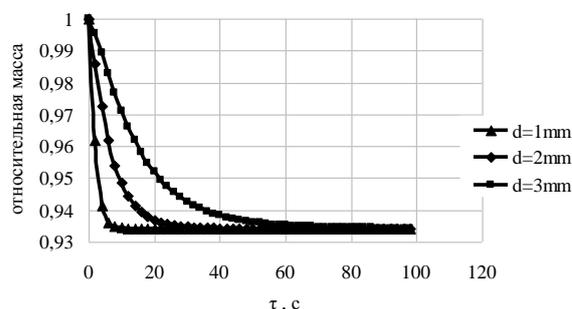


Рис. 3 – Кинетика изменения относительной массы гранулы аммиачной селитры при $T_c = 100$ °С, $U_{нач} = 0,01$ кг влаги/кг материала, $U_{кон} = 0,003$ кг влаги/кг материала

Оценивая влияние термодинамических характеристик теплоносителя на структуру пористого поверхностного слоя, следует отметить следующее:

1. С увеличением диаметра гранулы при произвольно выбранной температуре теплоносителя в структуре пористого слоя увеличивается количество

пор, уменьшается количество трещин и разломов. Это объясняется тем, что прогрев гранул меньшего диаметра осуществляется более интенсивно. В таком случае наблюдается резкий выход влаги и аммиака из ядра гранулы, что сопровождается образованием трещин и разломов вследствие резкого изменения объёма увлажнителя (перехода его в парообразное состояние) и возникающих внутренних напряжений. Структура поверхностного слоя гранул разного диаметра показана на рис. 4-6. Результаты исследования свойств гранул показали некоторое уменьшение их прочности при уменьшении диаметра.

2. С увеличением температуры теплоносителя при произвольно выбранном диаметре гранулы структура поверхностного слоя имеет различный вид. При температуре 90-110 °С поверхность гранулы имеет некоторое количество неглубоких пор, наблюдается преимущественно непористая структура (рис. 7). В этом случае удерживающая способность гранулы по отношению к дизельному топливу ниже нормативного показателя при достаточной прочности ядра гранулы.

При температуре 120-140 °С вследствие быстрого испарения влаги на поверхности гранулы преимущественно образуются трещины (рис. 8), которые увеличивают поглощательную способность гранулы, но существенно уменьшают прочность её ядра.

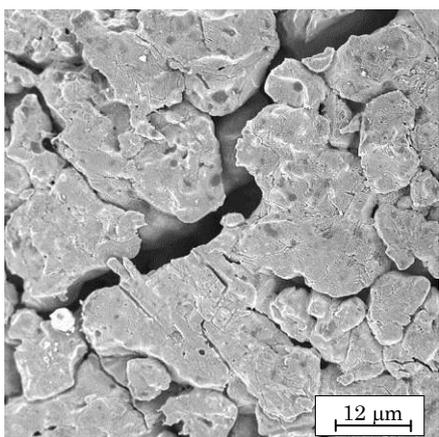


Рис. 4 – Поверхностный слой на грануле диаметром 1 мм

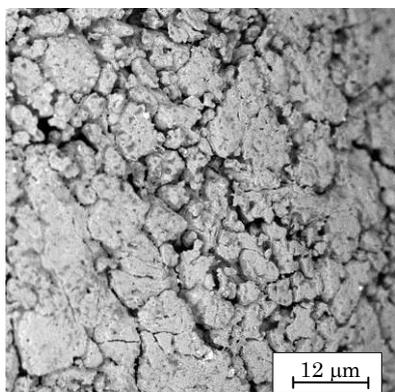


Рис. 5 – Поверхностный слой на грануле диаметром 2 мм

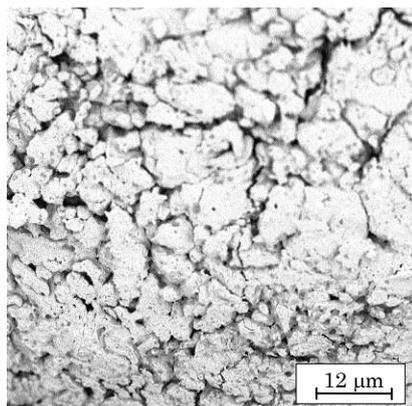
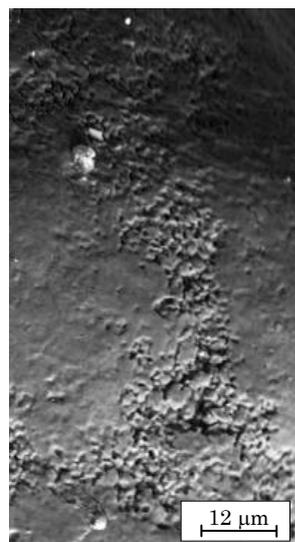
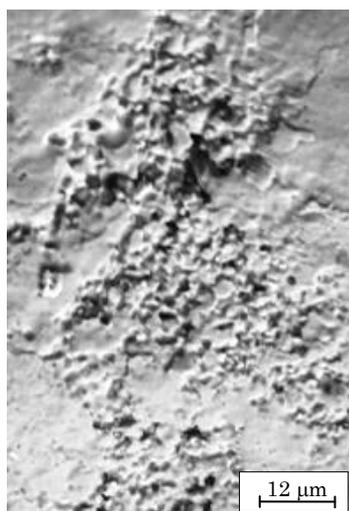


Рис. 6 – Поверхностный слой на грануле диаметром 3 мм

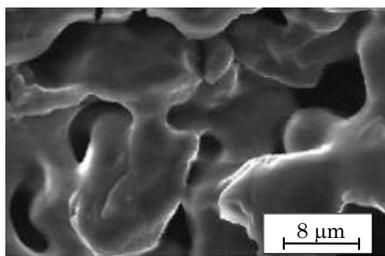


а

Рис. 7 – Образец, высушенный при температуре 90-110 °С

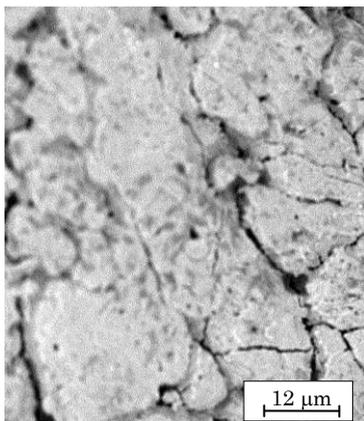


а



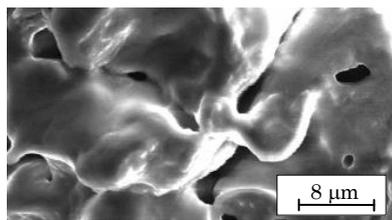
б

Рис. 8 – Образец, высушенный при температуре 110-120 °С: а – поверхность; б – скол



а

При температуре 110-120 °С на поверхности гранулы образуется слой с развитой пористой



б

Рис. 9 – Образец, высушенный при температуре 120-140 °С: а – поверхность; б – скол

структурой, поры достаточно глубокие, трещины в структуре практически отсутствуют (рис. 9). Удерживающая способность гранулы в таком случае достигает нормативных показателей при сохранении целостности и прочности ядра гранулы.

Данные исследований являются основой оптимизационного расчёта технологического процесса получения пористого наноструктурированного слоя в грануляторах вихревого типа.

Дополнительный интерес представляет изучение совместного слияния термодинамических характеристик теплоносителя и гидродинамических показателей его движения (в частности, интенсивности закрутки) на качество пористого поверхностного слоя на грануле аммиачной селитры. Решению этой проблемы будет посвящена вторая часть работы.

Работа выполнена в рамках бюджетной тематики № 0116U006812.

Thermodynamic Conditions for Obtaining 3D Nanostructured Porous Surface Layer on the Granules of Ammonium Nitrate

A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskiy

Sumy State University, 2, Rymyskogo-Korsakova st., 40007 Sumy, Ukraine

The paper deals with the study of thermodynamic conditions influence on nanostructured porous surface layer structure on ammonium nitrate granules. Calculation of granules heating and moisture removing from it in different thermodynamic indicators of heat transfer agent were conducted based on drying kinetics and dehydration theoretical model. The structure of granules surface, obtained under different thermodynamic characteristics of heat transfer agent, was investigated. The obtained data is a base for vortex granulator optimal technological parameters selection of as a part of devices for receiving of 3-D nanostructured porous surface layer on the ammonium nitrate granule.

Keywords: 3D Nanostructured Porous layer, Granulator, Thermodynamics

Термодинамічні умови 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 умов на структуру наноструктурованого пористого поверхневого шару на гранулах аміачної селітри. На підставі теоретичної моделі кінетики сушіння та зневоднення проведено розрахунок прогріву гранули і видалення вологи з неї при різних термодинамічних показниках теплоносія. Досліджено структуру поверхні гранул, які отримані при різних термодинамічних характеристиках теплоносія. Отримані дані є основою для підбору оптимальних технологічних параметрів роботи вихрових грануляторів у складі установок отримання 3-D наноструктурованого пористого поверхневого шару на гранулі аміачної селітри.

Ключові слова: 3D Наноструктурований Пористий Шар, Гранулятор, Термодинаміка

REFERENCES

1. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskyi, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* **6**, 42 (2013).
2. D. Buczkowski, *Central Eur. J. Energetic Mater.* **8** No 2, 99 (2011).
3. L. Tan, L.-H. Xia, Q.-J. Wu, S. Xu, D.-B. Liu, *Combustion, Explosion, and Shock Waves* **52** No 3, 335 (2016).
4. R. Kaewklum, V.I. Kuprianov, P.L. Douglas, *Energ. Convers. Manage.* **50**, 2999 (2009).
5. E.P. Volchkov, N.A. Dvornikov, V.V. Lukashov, R.Kh. Abdrakhmanov, *Thermophys. Aeromech.+* **20** No 6, 663 (2013).
6. N.A. Dvornikov, P.P. Belousov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* **52** No 2, 206 (2011).
7. R. Kaewklum, V.I. Kuprianov, *Fuel* **89**, 43 (2010).
8. A.A. Khalatov, *J. Eng. Phys. Thermophys.* **83** No 4, 794 (2010).
9. W. Zhang, *Int. J. Chem. React. Eng.* **7**, A15 (2009).
10. S.A. Burtsev, A.I. Leont'ev, *High Temp+*. **52** No 2, 297 (2014).
11. N. Voynov, N. Nikolaev, F. Kustod, A. Nikolaev, D. Tarovatyu, *Chem. Plant Raw Mater.* **3**, 173 (2008).
12. D. Levchenko, V. Arseniev, S. Melechuk, *Procedia Eng.* **39**, 28 (2012).
13. P. Eliaers, J.R. Pati, S. Dutta, J. De Wilde, *Chem. Eng. Sci.* **123**, 648 (2015).
14. S.A. Nebra, M.A. Silva, A.S. Mujumdar, *Dry. Technol.* **18**(3), 791 (2000).
15. B. Guignon, A. Duquenoy, *Dry. Technol.* **20**, 419 (2002).
16. R.W. Ashcraft, G.J. Heynderickx, G.B. Marin, *Chem. Eng. J.* **207-208**, 195 (2012).
17. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskyi, *Chem. Chem. Technol.* **9** No 2, 175 (2015).
18. A.E. Artyukhov, V.I. Sklabinskyi, *Chem. Chem. Technol.* **9** No 3, 337 (2015).
19. A.E. Artyukhov, *Chem. Petroleum Eng.* **49** No 11-12, 736 (2014).
20. M.G. Prokopov, D.A. Levchenko, A.E. Artyukhov, *Appl. Mechan. Mater.* **630**, 109 (2014).
21. A.E. Artyukhov, A.S. Fursa, K.V. Moskalenko, *Chem. Petroleum Eng.* **51** No 5-6, 311 (2015).
22. N.A. Artyukhova, A.B. Shandyba, A.E. Artyukhov, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* **1**, 92 (2014).
23. A.E. Artyukhov, A.A. Voznyi, *6th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2016)*, **5** No 2, 02NEA01 (2016).
24. A.E. Artyukhov, *6th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2016)*, **5** No 2, 02NEA02 (2016).