

УДК 66.047.595

**А.А. Селиверстов, И.Е. Тимофеев, С.Х. Загидуллин**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**НОВЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ  
ДЛЯ МНОГОТОННАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

*В многотоннажных химических и горно-химических производствах применяют различные конструкции сушильных аппаратов производительностью до 100–150 т/ч. Одним из основных требований, предъявляемых к этим аппаратам в непрерывных производствах, является стабильность и бесперебойность работы.*

*Вынужденные простои сушильного оборудования в калийной промышленности связаны с необходимостью периодической чистки его внутренних поверхностей от налипшего материала. С 60-х годов прошлого века этот недостаток пытались устранить за счет совершенствования отдельных узлов существующих сушилок. Хотя эти мероприятия были недостаточно результативными, разработкой принципиально нового сушильного оборудования практически не занимались.*

*Представлены аппараты, разработанные авторами специально для сушки адгезионно-активных материалов, в частности хлористого калия. Описываются особенности конструкции и принцип работы этих аппаратов.*

*В новой пневматической сушилке реализуется, по существу, новый гидродинамический режим работы, исключающий контакт влажного материала с внутренними стенками аппарата.*

*В аппарате со взвешенно-транспортируемым слоем благодаря совмещению гидродинамических режимов пневмотранспорта и кипящего слоя достигается сочетание преимуществ этих способов сушки.*

**Ключевые слова:** *пневматическая сушилка, взвешенно-транспортируемый слой, налипание, хлорид калия, гидродинамический режим.*

**A.A. Seliverstov, I.E. Timofeev, S.H. Zagidullin**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **NEW CONVECTIVE DRIERS FOR LARGE-CAPACITY ENTERPRISES**

*Diverse drying apparatus are exploited in large-capacity chemical and mining enterprises. Throughput of such driers comes up to 100–150 tph, and one of the dominant requirements to the driers is their stability and the uninterruptedness of operation.*

*Forced stops of driers in the potash industry are caused by the necessity of recurrent cleanings of inner surfaces of driers from stuck materials. This imperfection has been attempting to eliminate by means of improvements of separate construction units of conventional drying apparatus since 1960s. These attempts have been inefficient, but the design of new in principle apparatus has not been performed virtually.*

*The article is devoted to the review of new convective driers; the authors have designed for drying prone to adhering materials, potassium chloride in particular. Design features and principles of operation of the new driers are described in the article.*

*The new in essence hydrodynamic regime, which eliminates the possibility of engagement of wet particulate matter and inner surfaces of the apparatus, is organized in the designed pneumatic conveying drier.*

*In the drier with the fluidized transported bed due to the joining of hydrodynamic regimes of the fluidized bed and the pneumatic transport, the mode of drying combines advantages of the both.*

**Keywords:** *pneumatic conveying drier, fluidized transported bed, sticking, potassium chloride, hydrodynamic regime.*

Для сушки минерального сырья в многотоннажных производствах, в частности в производстве калийных удобрений, наибольшее распространение получили барабанные сушилки (БС), сушилки с псевдооживленным (кипящим) слоем (КС) и пневматические трубы-сушилки (ТС). Эксплуатация этих аппаратов в калийной промышленности выявила общую проблему, связанную с налипанием высушиваемого материала на их внутренние поверхности.

Исторически первыми для сушки хлорида калия (KCl), основного вида калийных удобрений, были БС, которые отличаются большими габаритами и низкой интенсивностью процесса. Эффективность их ис-

пользования дополнительно снижается из-за комкования и налипания материала на внутренние устройства барабана. Для борьбы с этими недостатками предложены различные устройства для механического разрушения образующихся комков продукта и очистки внутренних стенок барабана [1]. Однако все они недостаточно результативны, и в настоящее время применение БС в калийной промышленности постепенно сокращается.

В более современных сушилках КС высокая производительность сочетается с проблемой образования и накопления внутри аппарата крупных спекшихся комков материала и забивкой отверстий газораспределительной решетки [2].

Более широкому использованию наиболее простых и перспективных ТС также препятствует налипание исходного материала в зоне загрузки [3]. Для борьбы с этим явлением ТС подлежат периодическим (2–3 раза в сутки) механическим чисткам, которые продолжаются 5–10 мин и заключаются в обстукивании наружной поверхности аппарата.

Основной причиной налипания КС<sup>1</sup> является возрастание влажности поступающего на сушку материала от 6–8 до 8–10 % из-за периодических колебаний технологического режима на предыдущих стадиях обогащения калийного сырья.

Таким образом, попытки устранения налипания за счет частичного совершенствования отдельных узлов существующих сушилок уже практически исчерпаны. Ввиду этого актуальной является разработка принципиально новых конструкций аппаратов, свободных от проблем, типичных для сушилок КС<sup>1</sup>.

Одним из таких аппаратов является разработанная нами пневматическая сушилка (ПС)<sup>1</sup>, показанная на рис. 1.

В ней реализуется такой принцип движения газовых потоков и материала, который на начальном этапе сушки практически полностью исключает возможность непосредственного контакта высушиваемых частиц со стенками аппарата. С этой целью ПС выполнена из трех секций.

Нижняя секция присоединена к нагнетательному вентилятору атмосферного воздуха и питателю влажного материала. Средняя секция выполнена в виде двух концентрических обечаек, внутренняя из

---

<sup>1</sup> Пат. 2476792 (РФ), МПК F26B 17/10. Пневматическая сушилка / А.А. Селиверстов, И.Е. Тимофеев, Е.А. Шестаков, С.А. Шестаков; № 2011131360/06; заявл. 26.07.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6. 6 с.

которых снабжена отверстиями, а наружная является сплошной. В кольцевое пространство между ними подается горячий теплоноситель из топки. Верхняя секция заканчивается сепарационной камерой для отделения высушенного продукта от отработанного теплоносителя.

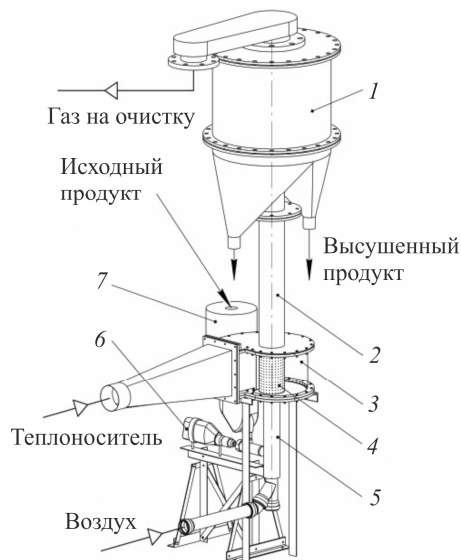


Рис. 1. Пневматическая сушилка (ПС): 1 – сепарационная камера; 5, 4, 2 – нижняя, средняя и верхняя секции; 3 – газораспределитель; 6 – питатель; 7 – бункер

Сушилка работает следующим образом.

Исходный влажный материал питателем вводится в нижнюю секцию, где смешивается с потоком атмосферного воздуха и образует восходящий поток газозвеси. Эта газозвесь поступает в среднюю секцию, где и происходит основная часть сушки материала. Процесс протекает в режиме интенсивного взаимодействия горизонтальных радиальных струй горячего теплоносителя с восходящим потоком газозвеси.

Далее высушенный материал в режиме пневмотранспорта попадает в верхнюю секцию, где окончательно досушивается и отделяется от отработанного теплоносителя.

Струйный ввод теплоносителя в ПС позволяет отеснить поток газозвеси от внутренних стенок средней секции аппарата и тем самым предотвратить налипание частиц. Для этой же цели нижняя секция выполняется меньшим диаметром, чем средняя.

Внутренняя обечайка средней секции может быть выполнена в виде расширяющегося кверху конуса, диаметр нижнего основания которого равен диаметру нижней секции, а диаметр верхнего – диаметру верхней секции. Такая форма средней секции не позволит образоваться отложениям материала на участке соединения нижней и средней секций в случае аварийного прекращения подачи теплоносителя в аппарат.

Интенсивность налипания КСІ при сушке в значительной степени обусловлена температурным режимом работы аппарата. В частности, В.А. Филипповым показано, что минимальное налипание КСІ наблюдается при температуре поверхности не более 50 °С. При дальнейшем нагреве до 80 °С склонность к налипанию резко возрастает, затем монотонно снижается и при температуре 200 °С практически полностью устраняется [4].

В конструкции ПС обеспечивается поддержание высокой температуры стенок средней секции (более 200 °С), что служит дополнительным фактором, предотвращающим налипание. Налипание в верхней секции также маловероятно, поскольку большая часть влаги испаряется уже на участке пневмотрубы высотой не более 3–4 м от места ввода материала.

Нижняя и средняя секции отделены друг от друга вставками из теплоизоляционного материала, что препятствует распространению тепла из более нагретой средней секции в нижнюю. Чтобы минимизировать возможность налипания материала в нижней секции, ее внутреннюю поверхность рекомендуется покрывать гидрофобным материалом, например фторопластом.

Дальнейшее развитие ПС получила в конструкции струйного нагревателя (СН)<sup>2</sup>. Для повышения равномерности распределения теплоносителя по сечению пневмотрубы в СН газораспределитель выполняется в виде улиткообразного коллектора. Коллектор рассчитывается таким образом, чтобы в нем создавалось постоянное статическое давление, под действием которого происходит подача теплоносителя внутрь пневмотрубы. В результате поток горячего теплоносителя движется радиально от периферии к центру. Это исключает образование

---

<sup>2</sup> Пат. 2525562 (РФ), МПК F26B 17/10. Струйный нагреватель / А.А. Селиверстов, С.Х. Загидуллин, И.Е. Тимофеев; № 2013122342/06; заявл. 14.05.2013; опубл. 20.08.2014. Бюл. № 23. 6 с.

настилающегося на внутренние стенки пневмотрубы потока, вращение газозвеси и, как следствие, контакт частиц материала со стенками.

Иной по сравнению с ПС и СН принцип взаимодействия теплоносителя и материала реализуется в сушилке со взвешенно-транспортируемым слоем (ВТС)<sup>3</sup>, схема которой представлена на рис. 2.

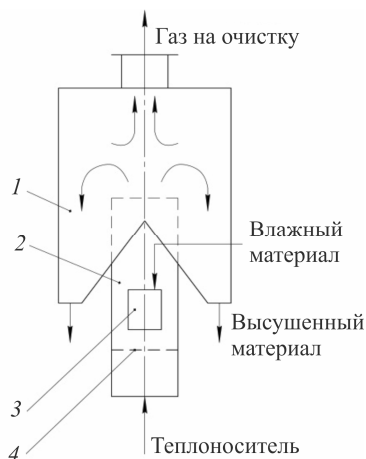


Рис. 2. Сушилка со взвешенно-транспортируемым слоем (ВТС): 1 – сепарационная камера; 2 – сушильная камера; 3 – питатель; 4 – газораспределительная решетка

Она содержит вертикальную сушильную камеру с отношением высоты к диаметру не более 3:4, снабженную в основании газораспределительной решеткой, на которую подается влажный материал. Теплоноситель поступает в нижнюю часть аппарата.

В рабочем пространстве сушильной камеры влажный материал ожижается теплоносителем, равномерно распределенным по всему сечению камеры при помощи решетки, и в виде ВТС поднимается в сепарационную камеру, где происходит разделение высушенного продукта и газового потока, удаляемого в систему очистки.

Отличительной особенностью сушки в ВТС является ведение процесса при фиктивной скорости газа в сушильной камере в диапазоне от 0,75–1,1 от скорости витания частиц материала наибольшего разме-

<sup>3</sup> Пат. 2529763 (РФ), МПК F26B 17/10. Способ сушки дисперсного материала во взвешенно-транспортируемом слое и установка для его осуществления / И.Е. Тимофеев, Е.А. Шестаков, А.А. Селиверстов, С.Х. Загидуллин, С.А. Шестаков, И.И. Тимофеев; № 2013136317/06; заявл. 01.08.2013.

ра. Это значительно превышает значения скорости теплоносителя, используемые в традиционных сушилках КС, но эти значения ниже, чем в ТС.

Фиктивная скорость газа в указанном диапазоне принимается в зависимости от доли наиболее крупных частиц в высушиваемом материале: чем больше это количество, тем выше требуемая скорость. Порозность ВТС в сушильной камере находится в диапазоне 0,75–0,95, это значение выше, чем в сушилках КС, но не достигается в ТС. С одной стороны, ВТС характеризуется восходящим движением материала, не наблюдающимся в сушилках КС, а с другой стороны, продольно-поперечным перемешиванием, отсутствующим в ТС. При работе ВТС его состояние стабильно: поступление влажного материала, подаваемого снизу, приводит к вытеснению из слоя сверху эквивалентного количества материала без эффектов фонтанирования и поршнеобразования.

С точки зрения тепловых нагрузок сушилка ВТС занимает промежуточное положение между сушилками КС и ТС [6]. Сушка в режиме ВТС обеспечивает более длительное время пребывания материала в аппарате по сравнению с ТС. В сочетании с интенсивным перемешиванием это позволяет достичь требуемой конечной влажности материала при требуемой высоте сушильной камеры существенно меньшей, чем в ТС, и с меньшим временем пребывания материала, чем в сушилках КС.

По сравнению с сушилками КС и ТС сушка в режиме ВТС позволяет следующее:

- интенсифицировать процесс сушки путем создания высоких относительных скоростей сушильного агента и материала в сушильной камере (по сравнению с сушилками КС);
- снизить вероятность налипания влажного материала на газораспределительную решетку и стенки аппарата за счет увеличения скорости газа (по сравнению с КС);
- уменьшить высоту аппарата (по сравнению с ТС);
- сократить термическое измельчение материала за счет обусловленного входным эффектом решетки падения температуры теплоносителя (по сравнению с ТС);
- повысить эффективность использования термического потенциала теплоносителя за счет создания ВТС с нестационарным взаимодействием фаз по высоте сушильной камеры;
- обеспечить необходимое время пребывания материала в сушилке благодаря эффекту удерживающей способности решетки.

Таким образом, разработку новых сушильных аппаратов следует вести как с применением в них рационального режима сушки, учитывающего особенности конкретного высушиваемого материала, так и с обеспечением стабильной работы при аварийных режимах. В частности, в новых сушилках для КС1 высокая производительность должна сочетаться с устойчивостью работы в случае повышения влажности исходного материала.

### **Список литературы**

1. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 130 с.
2. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.
3. Селиверстов А.А., Тимофеев И.Е., Загидуллин С.Х. К вопросу о налипании материала на рабочие поверхности пневматических сушилок // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 208–211.
4. Филиппов В.А. Конструкция, расчет и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. – М.: Недра, 1979. – 309 с.
5. К вопросу выбора сушильного аппарата при производстве хлорида калия / Е.А. Шестаков, И.Е. Тимофеев, С.А. Шестаков, А.А. Селиверстов // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. – Т. 16, № 15. – С. 121–122.

### **References**

1. Lykov M.V. Sushka v khimicheskoy promyshlennosti [Drying in chemical industry]. Moscow: Khimiya, 1970. 130 p.
2. Romankov P.G., Rashkovskaya N.B. Sushka vo vzveshennom sostoyanii [Drying in suspension state]. Leningrad: Khimiya, 1979. 272 p.
3. Seliverstov A.A., Timofeev I.E., Zagidullin S.H. K voprosu o nalipanii materiala na rabochie poverkhnosti pnevmaticheskikh sushilok [On the issue of material sticking on inner surface of pneumatic conveying drier]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya*, 2013, no. 2, pp. 208-211.
4. Filippov V.A. Konstruktsiya, raschet i ekspluatatsiya ustroystv i oborudovaniya dlya sushki mineralnogo syrya [Construction, calculation and exploitation of devices and equipment for drying of mineral raw materials]. Moscow: Nedra, 1979. 309 p.
5. Shestakov E.A., Timofeev I.E., Shestakov S.A., Seliverstov A.A. K voprosu vybora sushilnogo apparata pri proizvodstve khlorida kaliya [On the issue of the choice of the dryer for enterprises of potassium chloride]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, vol. 16, no. 15, pp. 121-122.



## **Об авторах**

**Селиверстов Артем Александрович** (Березники, Россия) – старший преподаватель кафедры технологий и механизации производств Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, г. Березники, ул. Тельмана, 7; e-mail: seliverstovartem@yandex.ru).

**Загидуллин Сафар Хабибуллович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов производственных процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mapp@pstu.ru).

**Тимофеев Иван Егорович** (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и механизации производств Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, г. Березники, ул. Тельмана, 7; e-mail: mapp@pstu.ru).

## **About the authors**

**Artem A. Seliverstov** (Berezniki, Russian Federation) – senior lecturer, department of technology and mechanization of industries, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, graduate student (Thalman st., 7, Berezniki, 618404, Russian Federation; e-mail: seliverstovartem@yandex.ru).

**Safar H. Zagidullin** (Perm, Russian Federation) – doctor of technical sciences, professor, head of department of machines and apparatus of industrial processes, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: mapp@pstu.ru).

**Ivan E. Timofeev** (Berezniki, Russian Federation) – Ph.D. of technical sciences, associate professor, department of technology and mechanization of industries, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University (Thalman st., 7, Berezniki, 618404, Russian Federation; e-mail: mapp@pstu.ru).

Получено 15.09.2014