

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СКРУББЕРА ВЕНТУРИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ГОРЛОВИНОЙ ДЛЯ АСПИРАЦИИ ЦЕХОВ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

А.В. Цветнов, А.К. Митин

ООО "КемИнС"

Представлена усовершенствованная конструкция скруббера Вентури с регулируемой горловиной, предназначенного для улавливания частиц из газовой фазы размером более 0,5 мкм. Определены гидродинамические режимы работы нового скруббера Вентури, соответствующие наибольшей эффективности по улавливанию частиц. Описана принципиальная схема по аспирации выбросов производства минеральных удобрений. Проведено сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных по улавливанию частиц KCl при аспирации цеха по производству калийных удобрений. Достигнутая остаточная запыленность менее 10 мг/м³. Представлены уравнения для расчета предлагаемого скруббера Вентури.

Ключевые слова: очистка газов от пыли, скруббер Вентури, регулируемая горловина, эффективность, гидравлическое сопротивление

The Effectiveness of Venturi Scrubber with Adjustable Throat for Aspiration of Shops for the Production of Mineral Fertilizers

A.V. Tsvetnov, A.K. Mitin

LLC "Kemins", 117246 Moscow, Russia

There was presented improved design of Venturi scrubber with adjustable throat, intended for trapping particles from gas phase with more than 0.5 microns. There were determined hydrodynamic modes of operation of a new Venturi scrubber corresponding to the greatest efficiency in trapping particles. There was described flow chart on aspiration of emissions of mineral fertilizers production. There was made a comparison between the results of a mathematical model and test data on trapping of KCl particles during aspiration of shop for production of potash fertilizers. The residual dust content achieved is less than 10 mg/m³. There were presented equations for calculation of offered Venturi scrubber.

Keywords: dust scrubber, Venturi scrubber, adjustable throat, effectiveness, hydraulic resistance

DOI: 10.18412/1816-0395-2017-8-0-0

Для предприятий химической отрасли, в частности по производству различных видов гранулированных минеральных удобрений, эффективность очистки выбросов является не только задачей экологической, но и экономической, позволяющей улавливать целевой продукт. В соответствии с данными справочника НДТ "Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот" в зависимости от производства и источника выброса возможен унос аммиачной селитры от 50 до 500 мг/м³, в цехах дробления, сушки, охлаждения, транспортировки сырья и удобрений на линию аспирации может приходиться концентрационная

нагрузка более 10 г/м³ частиц целевого продукта, уносимого газовым потоком в случае отсутствия газоочистных систем [1]. Таким образом, необходимость в высокоэффективной пылеулавливающей системе экономически обоснована. С точки зрения технического обоснования, для предприятий по производству минеральных удобрений целесообразно использовать мокрые способы очистки, поскольку выбросы могут иметь температуру более 100 °С и зачастую содержат кислые компоненты [2], при этом мокрые способы отличаются наименьшими эксплуатационными затратами [3].

Анализ литературных источников и опыт внедрения газо-

очистных систем позволяют заключить, что для улавливания частиц удобрений, имеющих размер > 0,5 мкм, целесообразно использовать высокоэффективные скрубберы Вентури, в которых распыл жидкости с образованием мелкодисперсной среды осуществляется с помощью газового потока, а улавливание капель с поглощенными частицами происходит в центробежном каплеуловителе [4–7]. Для аспирационных линий возможны флуктуации газовых расходов, что приводит к увеличению (уменьшению) скорости газового потока, проходящего через скруббер Вентури, и, как следствие, в соответствии с уравне-

нием Дарси-Вейсбаха увеличению (уменьшению) гидравлического сопротивления [8, 9]. Поддержание постоянства гидравлического сопротивления обеспечивает необходимое число единиц переноса, соответствующих неизменной эффективности очистки, что описывается расчетной зависимостью [5]:

$$N = BK^x, \quad (1)$$

где N — число единиц переноса; B, x — определяемые экспериментально константы, зависящие от вида пыли, её дисперсного состава [5]; $K = \Delta P_{\text{ск}} + P_{\text{ж}} Q_{\text{ж}} / Q_{\text{г}}$ — удельная энергия, затрачиваемая на пылеулавливание, кДж/1000 м³ газов; $\Delta P_{\text{ск}}$ — гидравлическое сопротивление скруббера; Па; $P_{\text{ж}}$ — напор распыливаемой скрубберной жидкости, Па; $Q_{\text{ж}}, Q_{\text{г}}$ — расходы скрубберной жидкости и газа соответственно, м³/с.

Число единиц переноса связано с эффективностью скруббера Вентури уравнением:

$$N = \ln(1/(1-E)), \quad (2)$$

где E — эффективность скруббера Вентури.

В этой связи для поддержания заданной эффективности очистки возможно использование скруббера Вентури с регулируемой горловиной, разработки которого проводились с 70-х гг., но в настоящее время широко не применяются из-за отсутствия эффективной и надежной системы регулирования [7, 10]. Более того, используемые на сегодняшний момент внутренние поверхности труб Вентури подвержены абразивному износу и инкрустациям, поскольку орошение осуществляется форсунками в объём трубы. Необходимо отметить, что при очистке от вязкой, смолистой пыли форсунки могут забиваться. По этой же причине существующие скрубберы Вентури служат источником образования больших объемов сточных вод. Недостатков, описанных выше, можно избежать при использовании усовершенствованного скруббера Вентури — скруббера с регулируемой горловиной (рис. 1). Данный скруббер отличается от существующих конструкций тем, что формирование дисперсности происходит благодаря взаимодействию газового потока и потока скрубберной жидкости, подаваемой из

регулирующего устройства, в противотоке. При этом безфорсуночная подача жидкости позволяет осуществлять многократную циркуляцию скрубберной жидкости без засорения внутренних устройств скруббера твердыми частицами, тем самым уменьшая сброс сточных вод.

Принцип действия скруббера Вентури с регулируемой горловиной

Представленный скруббер Вентури с регулируемой горловиной состоит из аппарата по созданию эффекта Вентури с поддержанием постоянной скорости газа через горловину и центробежного каплеуловителя. Для поддержания высокотурбулентного режима течения фаз и создания высоко развитой поверхности массообмена конструкцией скруббера предусмотрена тангенциальная подача части скрубберной жидкости, с целью исключения загрязнений внутренних поверхностей скруббера, и подача противотоком из конуса регулирующего устройства. Скрубберная жидкость подается без использования форсунок, а её распыл осуществляется за счет энергии газовой фазы при взаимодействии определенных объемов фаз (вначале прямоточно, затем противоточно). Внутренняя геометрия скруббера организована так, что скрубберная жидкость, подаваемая тангенциально, создает пленку жидкости в конфузоре, которая предотвращает контакт газовой фазы со стенками аппарата.

Регулирующее устройство в автоматическом режиме за счет приводного механизма изменяет свободное сечение горловины в случае изменения гидравлического сопротивления скруббера, что позволяет поддерживать в конечном итоге эффективность очистки на заданном уровне независимо от расхода газовой фазы. В каплеуловителе осуществляется гарантированное улавливание капель, созданных на выходе из горловины. Гарантия улавливания капель подтверждается математическим моделированием и опытно-промышленными данными. Геометрия каплеуловителя выбирается по значениям диаметра капель, созданных в горловине и коагулированных на выходе из

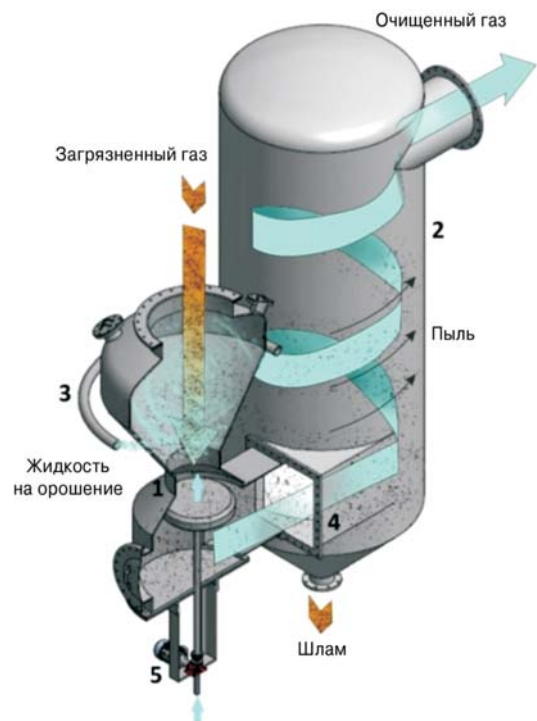


Рис. 1. Скруббер Вентури с регулируемой горловиной:

1 — регулируемая горловина; 2 — центробежный каплеуловитель; 3 — тангенциальный вход скрубберной жидкости на орошение; 4 — тангенциальный вход дисперсной среды с коагулированными частицами; 5 — привод регулирующего устройства

нее [11]. Диаметр капель, мкм, рассчитывается по модернизированному для представленного нами скруббера эмпирическому уравнению Льюиса:

$$d_k = 4920/W_0 + 1,35(q/0,1455)^{1,53}, \quad (3)$$

где W_0 — скорость газа в горловине скруббера, м/с; q — количество скрубберной жидкости на расход по газовой фазе, (л/ч)/(м³/ч).

Ниже представлены экспериментальные значения размеров диаметра капель, образующихся в диффузоре усовершенствованного скруббера Вентури при гидравлическом сопротивлении $\Delta P_{\text{ск}} = 4$ кПа и различном расходе скрубберной жидкости q .

d_k , мкм.....	80–90	95–100	125–137
q , (л/ч)/			
/(м ³ /ч)	0,5	1	1,7

Сопоставление экспериментальных данных и модернизированного уравнения (3) позволили подобрать необходимый расход скрубберной жидкости в условиях технологического процесса по

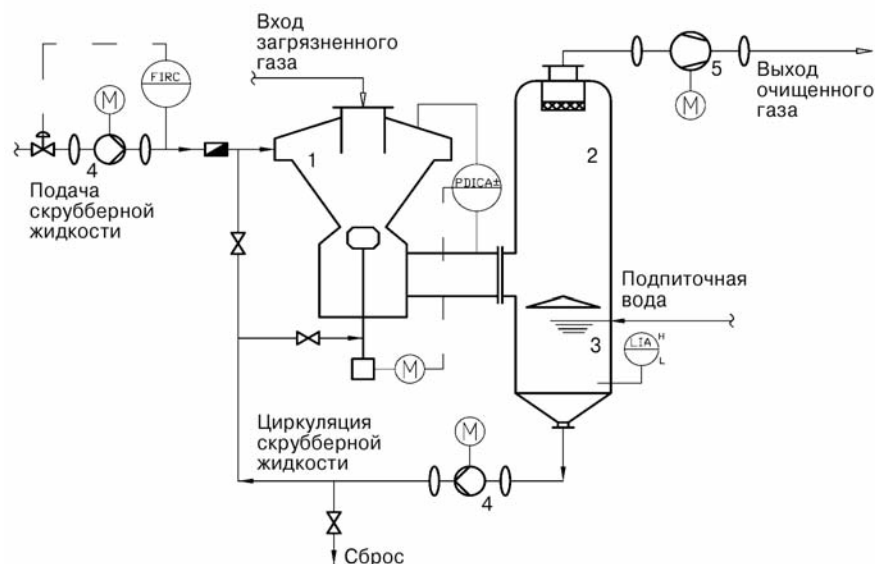


Рис. 2. Принципиальная схема газоочистной системы по улавливанию пыли из газовой фазы на примере аспирации цеха по производству KCl:
 1 – скруббер Вентури с регулируемой горловиной; 2 – центробежный каплеуловитель; 3 – интегрированная приемная емкость; 4 – насосы подачи скрубберной жидкости; 5 – дымосос

улавливание частиц KCl (рис. 2). В соответствии с кривой эффективности (рис. 3) центробежного каплеуловителя, входящего в состав усовершенствованного скруббера Вентури, для полной сепарации капель в условиях заданных технологических параметров их размер должен быть более 100 мкм, что по результатам математического моделирования должно соответствовать значению $q = 1,7 \text{ (л/ч)/(м}^3\text{/ч)}$.

Принципиальная схема аспирации выбросов производства минеральных удобрений

Принцип работы представленной на рис. 2 схемы заключается

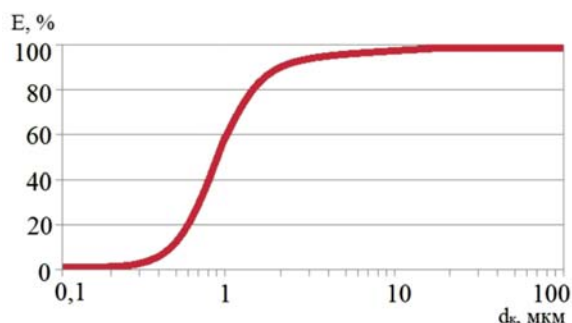


Рис. 3. Зависимость эффективности центробежного каплеуловителя в составе усовершенствованного скруббера Вентури (E) от диаметра капель (dк)

в следующем. Запыленный газовый поток расходом 30 000 м³/ч поступает в скруббер Вентури 1 через верхний штуцер. Циркуляционный раствор на орошение (~ 20 %-ный раствор KCl) с объемом циркуляции 50 м³/ч подается насосом 4 в скруббер Вентури тангенциально и движется от перелива в сходящуюся нижнюю часть. Благодаря данной конструкции скруббера Вентури внутренняя поверхность его стен покрыта пленкой раствора, что исключает инкрустации стенок.

В горловине скруббера Вентури очищаемый газ достигает наивысших скоростей, капли орошающего раствора дробятся газовым потоком и ускоряются, создается высокая поверхность для массообмена и турбулентный режим, интенсифицирующий массоотдачу и теплоотдачу. В результате этого загрязняющие вещества эффективно поглощаются жидкой фазой, далее в диффузоре скруббера происходит укрупнение капель воды, содержащих частицы пыли и абсорбированные загрязняющие вещества, и их отрыв от газовой фазы, а также охлаждение газовой фазы. Образовавшаяся дисперсная среда тангенциально поступает в центробежный каплеуловитель, где осуществляется сепарация капель от га-

зовой фазы. Сепарированные капли стекают в интегрированную емкость 3, куда также добавляется подпиточная вода для поддержания необходимого уровня и концентрации скрубберной жидкости. Как упоминалось выше, в данном скруббере возможно организовывать циркуляционный контур по скрубберной жидкости без последствий, связанных с вторичным загрязнением газовой фазы и засорением внутреннего устройства скруббера. Циркуляционный контур позволяет уменьшить сброс сточных вод в пять-семь раз в зависимости от запыленности газа на входе и характеристик насоса.

Достижимая остаточная запыленность при использовании организованной технологической схемы представленного скруббера Вентури составляет менее 10 мг/м³ при концентрации пыли удобрений на входе 10–12 г/м³. Дисперсный состав пыли, %: < 20 мкм – 5; 20–50 мкм – 40; 50–100 мкм – 30; 100–250 мкм – 25.

Эффективность скруббера Вентури с регулируемой горловиной

Эффективность скруббера Вентури зависит от гидравлического сопротивления. Чем выше скорость газового потока, тем больше гидравлическое сопротивление, а значит более интенсивно происходит взаимодействие газовой и жидкой фаз (дробление жидкой фазы газовой) с образованием мелкодисперсной фазы, имеющей высококоразвитую поверхность в виде микронных капель, которые поглощают загрязняющие вещества, присутствующие в газе. На рис. 4 представлены результаты математического моделирования по улавливанию частиц из газовой фазы в предлагаемом скруббере в зависимости от гидравлического сопротивления, регулируемого с помощью изменения сечения в горловине. На рис. 5 представлены результаты математического моделирования (на базе уравнений 1, 2) и опытно-промышленных испытаний по улавливанию частиц KCl в рассматриваемом скруббере Вентури по технологической схеме, описанной выше.

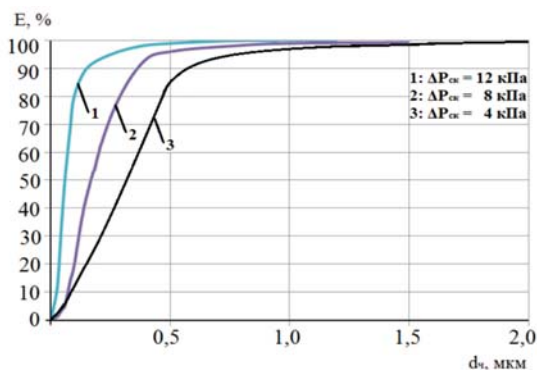


Рис. 4. Зависимость эффективности скруббера Вентури (E) по улавливанию частиц от их диаметра (d_p) при различном гидравлическом сопротивлении, поддерживаемом системой регулирования свободного сечения горловины

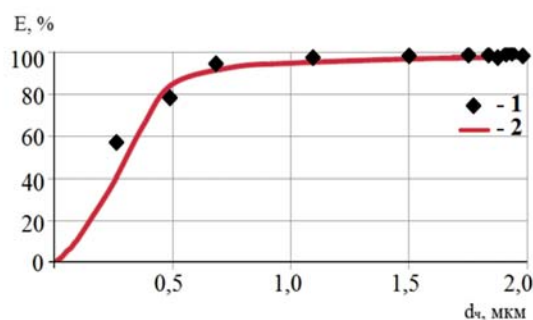


Рис. 5. Зависимость эффективности скруббера Вентури (E) по улавливанию частиц KCl от их диаметра (d_p) при $\Delta P_{ск} = 4$ кПа: 1 – экспериментальные точки; 2 – результаты моделирования

Таким образом, скруббер Вентури специальной конструкции, обеспечивающей поддержание заданного гидродинамического режима в соответствии с параметрами технологического процесса (расход газовой фазы, концентрация загрязняющих частиц, дисперсный состав), позволяет проводить высокоэффективную очистку газовой фазы от пыли на уровне сухих систем, обеспечивая работу с меньшими в разы эксплуатационными затратами. Представленная технология со скруббером Вентури не требует, например, дополнительных энергетических затрат на продувку, в отличие от рукавных фильтров, или на создание электрического поля, в отличие от электрофильтров, также отсутствует необходимость в постоянной замене фильтрующих элементов. При этом в скруббере Вентури возможна очистка горячих, агрессивных газовых сред с относительно высокой пылезагруженностью.

Литература

1. ИТС 2-2015. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. М.: Бюро НДТ, 2015. 898 с.
2. Чернышев А.К., Левин Б.В., Туголуков А.В. и др. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение. М.: ЗАО «Инфохим», 2009. 544 с.
3. Митин А.К., Николайкина Н.Е., Загустина Н.А., Пушнов А.С. Эффективность очистки газов от дихлорметана методом биофильтрации на различных насадках. Экология и промышленность России. 2015. № 5. С. 20–25.
4. Страус В. Промышленная очистка газов. Пер. с англ. Ю.Я. Косога. М.: Книга по требованию, 2012. 616 с.
5. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. В 3-х т. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. Т. 1. 915 с.
6. Олевский В.М. Технология аммиачной селитры. М.: Химия, 1978. 312 с.
7. Химвинга М. Повышение эффективности очистки пылегазовой смеси в аппарате распылительного типа: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Воронеж, 2016, 184 с.
8. Fernandez Alonso D., Goncalves J.A.S., Azzopardi B.J., Coury J.R. Drop size measurements in Venturi scrubbers. Chemical Engineering Science. 2001. V. 56. P. 4901–4911.
9. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1968. 847 с.
10. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мяжков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981. 392 с.
11. Ahmadvand F., Talaie M.R. CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber. The Chemical Engineering Journal. 2010. V. 160. P. 423–431.

References

1. ITS 2-2015. Proizvodstvo ammiaka, mineral'nyh udobrenij i neorganicheskih kislot. M.: Bjuro NDT, 2015. 898 s.
2. Chernyshev A.K., Levin B.V., Tugolukov A.V. i dr. Ammiachnaja selitra: svojstva, proizvodstvo, primenenie. M.: ZAO «Infohim», 2009. 544 s.
3. Mitin A.K., Nikolajkina N.E., Zagustina N.A., Pushnov A.S. Jefferktivnost' ochistki gazov ot dihlormetana metodom biofil'tracii na razlichnyh nasadkah. Jekologija i promyshlennost' Rossii. 2015. № 5. S. 20–25.
4. Straus V. Promyshlennaja ochistka gazov. Per. s ang. Ju.Ja. Kosogo. M.: Kniga po trebovaniju, 2012. 616 s.
5. Timonin A.S. Inzhenerno-jekologicheskij spravochnik. V 3-h t. Kaluga: Izd-vo N. Bochkarevoj, 2003. T. 1. 915 s.
6. Olevskij V.M. Tehnologija ammiachnoj selitry. M.: Himija, 1978. 312 s.
7. Himvinga M. Povyshenie jefferktivnosti ochistki pylegazovoj smesi v apparate raspylitel'nogo tipa: Dics. ... kand. tehn. nauk: 05.17.08. Voronezh, 2016, 184 s.
8. Fernandez Alonso D., Goncalves J.A.S., Azzopardi B.J., Coury J.R. Drop size measurements in Venturi scrubbers. Chemical Engineering Science. 2001. V. 56. P. 4901–4911.
9. Planovskij A.N. Processy i apparaty himicheskoj tehnologij. M.: Himija, 1968. 847 s.
10. Uzhov V.N., Val'dberg A.Ju., Mjagkov B.I., Reshidov I.K. Ochistka promyshlennyh gazov ot pyli. M.: Himija, 1981. 392 s.
11. Ahmadvand F., Talaie M.R. CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber. The Chemical Engineering Journal. 2010. V. 160. P. 423–431.

А.В. Цветнов – генеральный директор, ООО «КемИнС», 117246 Россия, г. Москва, Научный проезд, д. 14А, стр. 1, e-mail: tsvetnov.a@cesolutions.ru • А.К. Митин – канд. техн. наук, вед. инженер, e-mail: mitin@cesolutions.ru

A.V. Tsvetnov – Executive Director, LLC «Kemins», 117246 Russia, Moscow, Nauchny proezd 14A, bld. 1, e-mail: tsvetntnov.a@cesolutions.ru • A.K. Mitin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, e-mail: mitin@cesolutions.ru