

## **4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

УДК 621.928.93

*Краткое сообщение*

### **ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ОТ КАНАЛОВ В СТРУЙНОМ БАРБОТЕРЕ**

А.Ю. Атаева

*ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)»  
362021, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44  
angelaak@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.622

**Аннотация:** Работа посвящена экспериментальному исследованию поведения пузырьков при улавливании пылевидных материалов с наночастицами при соударении газожидкостных струй в барботажном слое. В статье рассмотрены вопросы применения каналов в струйном барботере и зависимость для выявления горизонтального перемещения в них пузырьков с наночастицами. Целью проведения данного этапа исследований является изучение поведения пузырьков газожидкостных струй при выходе без направляющего канала и через направляющий канал. Проанализированы результаты проведенных опытов на запатентованной конструкции струйного барботера. В статье представлены результаты проведенных опытов по изучению форм и размеров образующихся газовых пузырьков. Приведены графики, построенные после обработки кадров кинограммы по данным проведенных экспериментов. На базе предварительных испытаний обоснованы особенности использования каналов для создания соударения струй в экспериментальной установке для увеличения диапазона улавливаемых твердых частиц, включая наночастицы.

*Ключевые слова:* экосистема, пылегазоуловитель, наночастицы, канал, мокрое пылеулавливание, барботаж.

### **1. Введение**

Защита воздушного бассейна от загрязнений, поступающих в него с недостаточно очищенными газами, является важнейшей задачей охраны природы и повышения эффективности использования природных ресурсов. Все стадии технологических процессов производства цветных и редких металлов сопровождаются образованием пыли, уносимой вентиляционными газами. По мере развития различных производств, количество твердых отходов с высокой дисперсностью постоянно растет. Образующаяся из металлов пыль – это практически все извлекаемые цветные и редкие металлы (цинк, свинец, кадмий, индий), они уносятся с газами из-за недостаточно эффективного улавливания, что приводит к большим экономическим потерям. Поэтому пыль представляет собой очень ценное сырье для их извлечения [1]. Если улавливать наночастицы пыли, несущие в себе большой потенциал, возможна разработка новых технологий в сфере защиты окружающей среды.

Одним из эффективных направлений очистки является мокрый метод. Его преимущества – это возможность работы с газоочистными

эмиссиями с экстремальной температурой, взрыво- и пожароопасными потоками, а также с включениями с сильной электризацией. Мокрая очистка относится к механическому методу и направлена на контакт воды или другой жидкости с газовыми потоками [2- 4]. Аппараты для мокрой очистки неприхотливы и могут применяться для очистки неорганических соединений, смесей кислот, паров, аэрозолей и т.д. Немаловажную роль играет использование оборотного водоснабжения, т.е. повторное использование жидкости.

По нашему мнению, лучшим решением является усовершенствование не только производственных технологий, но и технологии очистки выбросов и стоков. Наиболее перспективным направлением повышения экологичности предприятий представляется разработка конструкций газопылеулавливающих аппаратов барботажного принципа действия, при котором достигается высокая степень очистки, позволяющая уловить наночастицы. При барботажном способе очищаемые газы проходят через слой жидкости в виде отдельных пузырьков. При хорошем диспергировании газов, из-за увеличения поверхности соприкосновения газов с жидкостью, улучшается процесс очистки газов, а также происходит абсорбция газообразных примесей [5].

## **2. Объекты и методы исследования**

Для исследования процессов мокрой очистки газов, а также для отладки конструкции газопылеуловителя и определения оптимальных параметров для его эксплуатации была сконструирована распределительная тарелка барботажного аппарата [6], на которую получен патент [7]. Использовать эту конструкцию можно для улавливания вредных компонентов газов химических, металлургических и других производств и тонкодисперсной пыли. Аппарат относится к мокрым пылеуловителям с внутренней циркуляцией жидкости. Кроме того, вода после очистки газов содержит компоненты, которые могут быть полезны в некоторых случаях как заменители поверхностно-активных веществ или кислот. Образованные в ходе очистки кислоты могут быть использованы по необходимости. Концентрацию кислоты можно увеличить путём удаления воды выпариванием, дистилляцией, ректификацией.

В предлагаемой конструкции аппарата кроме образования пузырьков газа при барботаже предусматривается соударение воздушных струй. Пылегазовая смесь подлежащая очистке подается через трубу, проходит через колпачки, каналы и слой жидкости, очищается от пыли и вредных компонентов газов. При обычном барботаже пузырьки газа поднимаются кверху свободно и внутри них могут пройти через жидкость неуловленные

частицы. При ударе пузырьков друг о друга значительно увеличивается вероятность осаждения частицы пыли на внутренней поверхности пузырька и ее дальнейшее улавливание слоем жидкости [8].

Частицы, составляющие пыль, тем вредней, чем больше ее дисперсность. При этом увеличивается суммарная поверхность раздробленного вещества, и оно куда активней вступает в химические реакции, у него становится больше объемных электрических зарядов, идет повышенное поглощение газов.

В пылеулавливании размеры частиц характеризуются величиной, определяющей скорость ее осаждения. Это седиментационный диаметр – диаметр шара, скорость осаждения и плотность которого равны скорости осаждения и плотности частиц неправильной формы. При определенных значениях удельного веса, размера и формы частицы сила трения может уравновесить силу тяжести и падение ее будет продолжаться с постоянной скоростью по закону Стокса [9-11]. Пылевые частицы различной формы при одной и той же массе оседают с разной скоростью  $V_{sub}$ . Количественное описание этого процесса можно показать уравнением Стокса:

$$V_{sub} = \frac{(\rho_p - \rho_l)g}{18\eta} d_p^2, \quad (1)$$

где  $\rho_p$  – плотность материала частиц,  $\rho_l$  – плотность жидкости,  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости,  $d$  – диаметр частицы,  $g$  – ускорение свободного падения.

При барботаже оседание частичек пыли на поверхности пузырька создается появлением газовой циркуляции внутри пузырьков и осуществляется под действием инерции, гравитации и диффузии. В барботажных пылеуловителях происходит инерционное осаждение пыли, которое зависит от траектории движения пузырьков. Влияние силы инерции  $F_u$  на седиментацию частицы пыли на поверхность пузырька газа может быть показано гидродинамическим критерием Фруда.

При вращательном движении пузырьков в барботере на них будут действовать центробежная сила  $F_{cf}$  переносного движения

$$F_{cf} = m\omega^2 r, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы,  $\omega$  – угловая скорость,  $r$  – наружный радиус ротора, и сила инерции Кориолиса

$$F_C = 2m\omega v_r, \quad (3)$$

где  $v_r$  – скорость пузырька вдоль лопасти, и критерий Фруда [4] примет вид:

$$F_r = \frac{F_{cf}}{G} = \frac{\omega \cdot \sqrt{\omega^2 r^2 + 4v_r^2}}{g}, \quad (4)$$

где  $G$  – сила тяжести, действующая на частицу.

### **3. Результаты и обсуждения**

На процесс отрыва пузырька при рассматриваемом горизонтальном движении газа влияет скорость выхода газа из прорези. Сила сопротивления отрыва преодолевается Архимедовой силой и силой инерции пузырька. При проведении опытов на лабораторной установке [5] с радиальными и тангенциальными прорезями применялась видеосъемка выхода пузырьков из прорезей.

В [6] приведен эксперимент взаимодействия газожидкостных струй в струйном барботере при двух колпачках в установке. Из-за невозможности исследования параметров пузырьков на выходе из прорезей при взаимодействии газожидкостных струй, при двух колпачках в струйном барботере, был запланирован эксперимент с одним колпачком (другой был заглушен). Данные этого опыта позволяют получить результаты для уточнения параметров при проведении экспериментов с использованием обоих колпачков и взаимонаправленных каналов, окружающих колпачки, при взаимодействии струй.

По данным проведенных экспериментов были построены графики после обработки кадров кинограммы. На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость перемещения от времени пузырьков с наночастицами при одном колпачке с радиальными прорезями при открытом входном патрубке вентилятора на 25%. По данным графиков, после обработки на компьютере были получены следующие эмпирические зависимости  $x = f(t)$ : 1 – пузырек (черный)  $x = 40,2t + 1,95$ , 2 – пузырек (красный)  $x = 52,4t - 0,05$ , 3 – пузырек (синий)  $x = 40,2t + 0,95$ . Совпадения зависимостей для двух пузырьков показывает, что они движутся почти параллельно, т.е. с небольшим отклонением в зависимости от времени  $t$ .

По экспериментальным данным также выявили, что при всплытии меняется форма и размер пузырьков от 2-3 мм на выходе из прорези колпачка до 9-25 мм при высоте всплытия 9-30 мм. Траектория пузырьков, выходящих из прорезей колпачков в зоне их выхода получается криволинейной, так как пузырьки движутся под действием сил сопротивления жидкости, горизонтальных сил инерции, и подъемной силы Архимеда. Для установления траектории перемещения пузырьков в горизонтальном направлении для сравнения, проводились исследования и с использованием направляющих каналов, установленных на выходе из колпачков в виде улитки с направленными навстречу друг другу выходами. Направляющие каналы придают пузырькам воздуха большую

скорость, за счет этого уменьшается влияние составляющей силы всплытия и газожидкостные струи после выхода из каналов начинают соударяться, происходит осаждение пыли за счет удара пузырьков газожидкостных струй друг о друга и инерционно-турбулентное осаждение частиц в слое турбулизированной пены. Экспериментально установлено оптимальное расстояние между каналами, при котором происходило соударение струй. С установленными направляющими каналами были проведены опыты для выявления горизонтального перемещения пузырьков и построены графики после обработки результатов видеосъемки.

На рис. 2 приведен график зависимости перемещения от времени с одним колпачком, с радиальными прорезями, с направляющим каналом, при открытом входном патрубке вентилятора на 25%. По данным графиков, после обработки на компьютере были получены следующие эмпирические зависимости  $x = f(t)$ : пузырек (красный):  $x = 101,5t - 0,07$ , пузырек (черный):  $x = 83,1t + 0,44$ , пузырек (синий):  $x = 80,0t - 0,06$ .

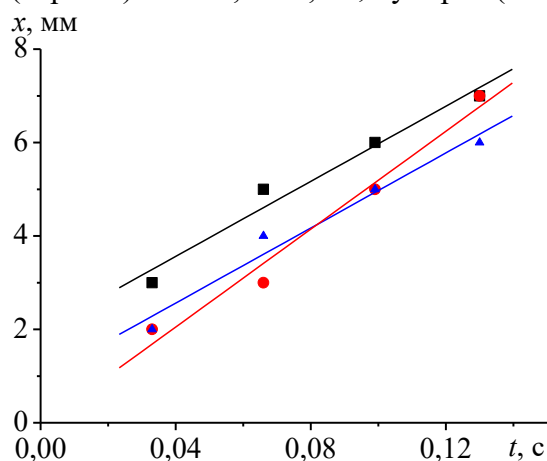


Рис. 1. График перемещения в горизонтальном направлении  $x = f(t)$  без каналов.

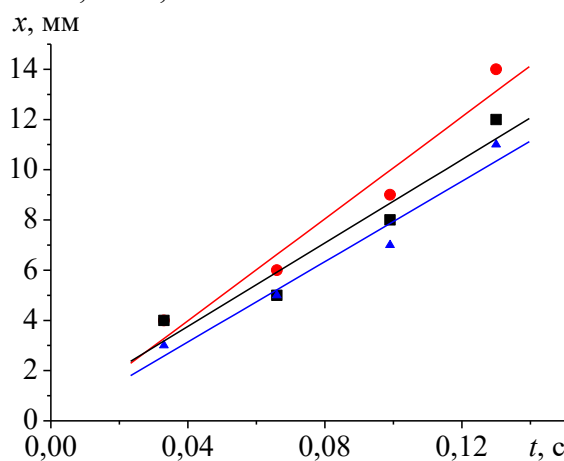


Рис. 2. График перемещения в горизонтальном направлении  $x = f(t)$  при наличии каналов.

Анализ имеющихся режимов образования и движения пузырьков в жидкой среде установил, что более эффективным является пенный режим [3], для получения которого в промышленности обычно добавляются поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Оценка изменения процесса выхода пузырьков из прорезей колпачка показал, что на выходе из колпачков увеличивается траектория вылета газовой смеси с применением направляющих каналов и возрастает время пребывания пузырька в жидкости и его контакта с пылью, что способствует получению пенного режима барботажа без использования ПАВ. За счет соударения струй происходит дробление пузырьков и увеличение поверхности контакта фаз, что улучшает эффективность очистки газа от мелкодисперсной пыли.

#### 4. Выводы

По результатам исследований получены данные для использования пары колпачков с взаимонаправленными направляющими каналами для получения пенного режима с диспергированием пузырьков. Получены эмпирические зависимости размеров и горизонтального перемещения пузырьков от времени в зоне выхода из прорезей колпачков и из направляющих каналов этих колпачков. Эти результаты использованы при конструировании опытного образца струйного барботёра, в котором вследствие применения нового принципа действия возможно расширение диапазона улавливания твёрдых частиц, включая наночастицы.

*Работа выполняется с привлечением аппаратуры Центра коллективного пользования научным оборудованием ЦКП НО СКГМИ (ГТУ).*

#### Библиографический список:

1. **Атаева, А.Ю.** Современные методы гранулометрического анализа пылевидных материалов, содержащих наночастицы / А.Ю. Атаева, Г.И. Свердлик, Д. А. Камболов, А.Р. Атаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 12. – С. 44-52. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.044.
2. **Шиляев, М.И.** Методы расчета пылеулавливающих систем / М.И. Шиляев. – М. Форум, 2014. – 320 с.
3. **Швыдкий, В.С.** Очистка газов: Справочное издание / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
4. **Гейер, В.Г.** Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
5. **Свердлик, Г.И.** Разработка классификации барботажных аппаратов и их выбор для улавливания наночастиц пыли / Г.И. Свердлик, А.Ю. Атаева, Д.А. Камболов, А.Р. Атаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 566-575. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.566.
6. **Свердлик, Г.И.** Исследование параметров для получения пенного режима в струйном барботере / Г.И. Свердлик, А.С. Выскребенец, Р.Н. Максимов, А.Ю. Атаева // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 430-434. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.430.
7. **Пат. 2303479 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B01D47/02, B01D3/20.** Распределительная тарелка массообменного аппарата для мокрой очистки газа / Свердлик Г.И., Выскребенец А.С., Атаева А.Ю.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (СКГМИ (ГТУ)). – № 2006103168/15; заявл. 03.02.06; опубл. 27.07.07, Бюл. № 21. – 7 с.
8. **Рамм, В.М.** Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
9. **Temam, R.** Navier–Stokes equations: theory and numerical analysis / R. Temam // In: AMS eBooks. – Bloomington: AMS Chelsea Publishing, 1984. – V. 343. – 408 p. DOI: 10.1090/chel/343.
10. **Doshi, P.** Persistence of memory in drop breakup: the breakdown of universality / P. Doshi, I. Cohen, W.W. Zhang et al. // Science. – 2003. – V. 302. – I. 5648. – P. 1185-1188. DOI: 10.1126/science.1089272.
11. **Keim, N.C.** Destruction of air bubbles in water: memory and violation of cylindrical symmetry / N.C. Keim, P. Møller, W.W. Zhang, S.R. Nagel // Physical Review Letters. – 2006. – V. 97. – I. 14. – P. 144503-1-144503-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.144503.

#### References:

1. Ataeva A.Yu., Sverdlik G.I., Kambolov D.A., Ataev A.R. Sovremennye metody granulometricheskogo analiza pylevidnyh materialov, soderzhashchih nanochasticy [Modern methods of granulometric analysis of dusted materials containing nanoparticles], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],

- 2018, issue 12, pp. 44-52. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.044. (In Russian).
2. Shilyaev M.I. *Metody rascheta pyleulavlivayushchih sistem* [Calculation methods for dust collection systems], Moscow, Forum Publ., 2014, 320 p. (In Russian).
3. Shvydkiy V.S., Ladygichev M.G. *Ochistka gazov: Spravochnoye izdaniye* [Purification of gases: Reference book], Moscow, Teploenergetik Publ., 2002, 640 p. (In Russian).
4. Geyyer V.G., Dulin V.S., Zarya A.N. *Gidravlika i gidroprivod: uchebnik dlya vuzov* [Hydraulics and hydraulic drive: textbook for universities], Moscow Nedra Publ., 1991, 331 p. (In Russian).
5. Sverdlik, G.I., Ataeva A.Yu., Kambolov D.A., Ataev A.R. Razrabotka klassifikatsii barbotaznykh apparatov i ih vybor dlya ulavlivaniya nanochastich pyli [Classification and selection of barbage equipment for collecting dust nanoparticles], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2018, issue 10, pp. 566-575. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.566. (In Russian).
6. Sverdlik, G.I., Vickrebenets A.S., Maksimov R.N., Ataeva A.Y. Issledovanie parametrov dlya polucheniya pennogo rezhima v strujnom barbotere [Research of parameters of a foam in the jet regime bubbler], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2017, issue 9, pp. 430-434. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.430. (In Russian).
7. Sverdlik G.I., Vyskrebenets A.S., Ataeva A.Yu. *Raspredeitel'naya tarelka massoobmennogo apparata dlya mokroj ochistki gaza* [Distribution tray of mass transfer apparatus for wet gas cleaning]. Patent RF, no. 2303479, 2007. (In Russian).
8. Ramm, V.M. *Absorbtsiya gazov* [Gas absorption], 2<sup>nd</sup> ed., Moscow, Khimiya Publ., 1976, 656 p. (In Russian).
9. Temam R. *Navier–Stokes equations: theory and numerical analysis*, AMS eBooks, Bloomington, Indiana University, AMS Chelsea Publishing, 1984, vol. 343, 408 p. DOI: 10.1090/chel/343.
10. Doshi P., Cohen I., Zhang W.W. et al. Persistence of memory in drop breakup: the breakdown of universality, *Science*, 2003, vol. 302, issue 5648, pp. 1185-1188. DOI: 10.1126/science.1089272.
11. Keim N.C., Møller P., Zhang W.W., Nagel S.R. Destruction of air bubbles in water: memory and violation of cylindrical symmetry, *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, issue 14, pp. 144503-1-144503-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.144503.

*Short Communication*

## **DEPENDENCE OF THE DISPLACEMENT OF NANOPARTICLES ON CHANNELS IN A JET BUBBLER**

A.Yu. Ataeva

*North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz,  
Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.622

**Abstract:** The work is devoted to an experimental study of the behavior of bubbles when capturing pulverized materials with nanoparticles in the course of colliding of gas-liquid jets in a bubbling layer. The article discusses the use of channels in a jet bubbler and the dependence for detecting horizontal movement of bubbles with nanoparticles in them. The purpose of this stage of research is to study the behavior of gas-liquid jets when exiting without a guide channel and through a guide channel. The results of experiments conducted on the patented design of the jet bubbler are analyzed. The article presents the results of experiments conducted to study the shapes and sizes of formed gas bubbles. The graphs constructed after processing the frames of the kinogram according to the data of the experiments are given. On the basis of preliminary tests, the features of using channels to create the jet collisions in an experimental setup to increase the range of captured solid particles, including nanoparticles, are substantiated.

**Keywords:** *ecosystem, dust and gas separator, nanoparticles, channel, wet dust collection, bubbling.*

*Атаева Анжела Юрьевна – к.т.н., доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», директор Центра коллективного пользования научным оборудованием, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»*

*Angela Yu. Ataeva – Ph. D., Docent, Department «Technological Machines and Equipment», Director of the Center of Collective Use of Scientific Equipment, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)*

Поступила в редакцию/received: 02.09.2023; после рецензирования/reviced: 10.10.2023; принята/accepted: 17.10.2023.