Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТРУЙНОГО БАРБОТЕРА ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

Г.И. Свердлик, А.Ю. Атаева, А.Р. Атаев

*ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»*

*362021, Россия, РСО-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44
angelaak@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.706

Аннотация. В СКГМИ (ГТУ) разработана конструкция струйного барботера, в основу которого положена запатентованная конструкция основного узла аппарата – распределительной тарелки, позволяющей реализовать в барботере пенный режим. Данный пылеуловитель позволяет улавливать мелкие частицы пыли (< 1 мкм), включая наночастицы, не улавливаемые в рукавных фильтрах. В статье приведена методика расчета гидравлического сопротивления барботера, необходимая для использования при выборе вентилятора для процесса пылеулавливания в барботере. Гидравлическое сопротивление барботера определяется как сумма составляющих: статического давления слоя жидкости, капиллярного перепада в зоне образования пузырьков и сопротивлений деталей распределительной тарелки. Разработанная методика была использована при проектировании технологической линии очистки газов от пылевидных возгонов вельц-печей цинкового производства, содержащих наночастицы. *Ключевые слова:* гидравлическое сопротивление, барботер, пузырьки, наночастицы, капиллярный перепад, поверхностное натяжение.

1. Введение

В СКГМИ (ГТУ) на основе теоретических исследований и экспериментов на лабораторной установке, представляющей фрагмент аппарата, разработана конструкция струйного барботера для улавливания мелких частиц пыли, включая наночастицы, не улавливаемые рукавными фильтрами. В основу аппарата положена запатентованная [1] конструкция распределительной тарелки. Улавливание в аппарате мелких пылевидных частиц, включая частицы наноразмеров, обусловлено взаимодействием газовых струй, обеспечивающим хорошее диспергирование газа с образованием мелких пузырьков при пенном режиме [2]. Одной из основных характеристик для струйного барботера является его гидравлическое сопротивление, величина которого учитывается при выборе вентилятора, подающего запыленный воздух в барботер.

2. Методика определения гидравлического сопротивления струйного барботера

Для определения данного сопротивления была разработана нижеприведенная методика. На рис. 1 показана часть корпуса 1 струйного барботера с распределительной тарелкой 2. На тарелке равномерно расположены колпачки 3. В зоне прорезей 5 к колпачкам прикреплены

направляющие каналы 4. С целью создания процесса взаимодействия газожидкостных струй колпачки распределены на пары, и в каждой паре выходы каналов колпачков направлены навстречу друг другу. Запыленные газы поступают в колпачки по патрубкам 6.

Рис. 1. Схема к расчету гидравлического сопротивления струйного барботера: 1 – корпус, 2 – распределительная тарелка, 3 – колпачок, 4 – направляющий канал, 5 – прорези колпачка, 6 – подающий патрубок. $h_s = 0,02$ м – высота прорези.

Гидравлическое сопротивление пенного аппарата с распределительной тарелкой с отверстиями в литературе [3] определяется как сумма составляющих сопротивлений. В нашем случае гидравлическое сопротивление струйного барботера Δp определяется формулой

$$\Delta p = \Delta p_{st} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p'_m + \Delta p''_m + \Delta p_{ch}, \quad (1)$$

где Δp_{st} – статическое давление слоя жидкости, Δp_{σ} – капиллярный перепад давления в зоне образования пузырьков, обусловленный поверхностным натяжением жидкости, $\Delta p'_m$ – гидравлическое сопротивление, связанное с прохождением газа через патрубок и под колпачком, $\Delta p''$ – сопротивление при прохождении газа через прорези в колпачке, Δp_{ch} – гидравлическое сопротивление направляющего канала.

Составляющие выражения (1) определяются по формулам:

– статическое давление слоя жидкости

$$\Delta p_{st} = \rho_l g h_b, \quad (2)$$

где $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкости (вода), $h_b = 0,075$ м – высота исходного слоя жидкости над уровнем прорезей колпачка.

– капиллярный перепад в зоне образования пузырьков

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4\sigma_l}{d_0}, \quad (3)$$

где $\sigma_l = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения жидкости (вода), $d_0 = 0,006$ м – эквивалентный диаметр открытого окна прорези

$$d_0 = \sqrt{\frac{4bl_0}{\pi}}, \quad (4)$$

где $l_0 = 0,005 \div 0,007$ м – открытие прорези (см. рис. 1).

Начальное открытие прорези по уравнению Ю.К. Молоканова [5]

$$l_0 = f_1 f_2 \sqrt{\frac{\sigma_l}{g\rho_l}}, \quad (5)$$

где $f_1 = 2$ и $f_2 = 1,25$ – опытные коэффициенты, зависящие от формы прорезей.

– гидравлическое сопротивление сухой колпачковой тарелки в литературе [4] рассматривается как состоящее из двух частей

$$\Delta p_m = \Delta p'_m + \Delta p''_m, \quad (6)$$

где $\Delta p'_m$ – сопротивление, обусловленное прохождением воздуха через патрубок и под колпачком, $\Delta p''_m$ – сопротивление, связанное с прохождением газа через прорези в колпачке. Причем

$$\Delta p'_m = \zeta_1 \frac{\rho_g v_{bp}^2}{2}, \quad (7)$$

где $\zeta_1 = 3$ – коэффициент сопротивления движению воздуха в подающей системе, состоящей из патрубков и колпачка, $\rho_g = 1,29$ кг/м³ – плотность газа (воздух), $v_{bp} = 5,36$ м/с – скорость газа в патрубке (воздуха). За величину v_{bp} можно принимать скорость в патрубке лабораторной установки для создания одинакового статического давления под колпачком в экспериментальной установке и в промышленном аппарате. Учитывая, что скорость в патрубке падает по его длине, так как под крышкой колпачка динамический напор превращается в статический для возможности открывания окон в прорезях и преодоления сопротивления под колпачком, величину v_{bp} можно принимать как среднее значение между скоростью на входе в патрубок и на выходе из него. Скорость на входе $v_{s,max}$ можно определять из допущения, что расход воздуха в подающей трубе установки равен расходу в двух патрубках:

$$v_{s,max} = \frac{d_{fp}^2 v_{fp}}{2d_{bp}^2}, \quad (8)$$

где d_{fp} – внутренний диаметр подающей трубы, v_{fp} – скорость воздуха в подающей трубе (принимается по экспериментальным данным), d_{bp} –

внутренний диаметр патрубка. Скорость воздуха под колпачком значительно меньше значения $v_{s_{\max}}$, и с небольшой погрешностью можно вычислять среднюю скорость в патрубке как $v_{bp} = v_{s_{\max}}/2$.

Сопротивление, обусловленное прохождением газа через тангенциальные прорезы в колпачке

$$\Delta p_m'' = \zeta_2 \frac{\rho_g v^2}{2}, \quad (9)$$

где $\zeta_2 = 2,175$ – коэффициент сопротивления сухой прорези колпачка, $v = 15$ м/с – скорость газа в прорезях колпачков.

Приведенная ниже формула получена из условия равенства силы давления на внутреннюю поверхность пузырька сумме сил поверхностного натяжения при отрыве пузырька и гидравлического сопротивления росту пузырька:

$$v = \frac{6\eta d_b + \sqrt{(6\eta d_b)^2 + 0,5\rho_g d_b^2 d_{eqw} k \sigma_l}}{0,25\rho_g d_b^2}, \quad (10)$$

где $\eta = 1,004 \cdot 10^{-3}$ Па·с – коэффициент динамической вязкости (вода), $d_b = 0,006$ м – диаметр пузырька, $d_{eqw} = 0,005$ м – эквивалентный диаметр окна прорези, $k_d = 0,67$ – коэффициент, учитывающий сужение диаметра шейки пузырька перед отрывом от прорези.

Величина коэффициента ζ_2 связана с коэффициентом k , зависящим от толщины прорези колпачка [3]

$$\zeta_2 = 1,45k. \quad (11)$$

При определении сопротивления Δp_{ch} направляющий канал рассматривается как эквивалентная круглая труба с плавным поворотом с эквивалентным диаметром, и ее гидравлическое сопротивление включает сопротивление трения по длине трубы и местные сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления для канала с прямоугольным сечением выбираем как для круглых труб с эквивалентным диаметром [6]

$$d_{eq} = \frac{2h_{ch}b_{ch}}{h_{ch} + b_{ch}}, \quad (12)$$

где h_{ch} и b_{ch} – соответственно высота и ширина прямоугольного сечения направляющего канала. Для расчета гидравлического сопротивления трубы с переменным сечением она рассматривается как эквивалентная труба с постоянным диаметром. Принимаем следующие допущения. За расчетные значения параметров диаметра и скорости газожидкостной струи в трубе принимаем средние значения эквивалентного диаметра и скорости струи в направляющем канале. В этом случае средний

эквивалентный диаметр

$$d_{eqav} = \frac{d_{eq1} + d_{eq2}}{2} = h_{ch} \left(\frac{b_{ch1}}{h_{ch} + b_{ch1}} + \frac{b_{ch2}}{h_{ch} + b_{ch2}} \right), \quad (13)$$

где d_{eq1} – эквивалентный диаметр в начальном сечении канала (см. рис. 1), d_{eq2} – эквивалентный диаметр в конечном сечении канала, b_{ch1} – ширина канала в начальном сечении, b_{ch2} – ширина канала в конечном сечении.

Величина средней скорости струи v_{avp} в расчетной трубе из условия проектирования направляющего канала принимается равной скорости воздуха в прорезях колпачков. Тогда сопротивление направляющего канала

$$\Delta p_{ch} = \Delta p_{lch} + \Delta p_{chl} = \lambda \frac{l_{ch}}{d_{eqav}} \cdot \frac{v_{avp}^2}{2g} + \zeta_l \frac{v_{avch}^2}{2g}, \quad (14)$$

где Δp_{lch} – сопротивление трения по длине канала, Δp_{chl} – местные сопротивления в канале, $\lambda = 0,038$ – коэффициент сопротивления при трении в канале [7], ζ_l – коэффициент местных сопротивлений в канале, $l_{ch} = 0,316$ м – длина канала, $v_{avch} = 15$ м/с – средняя скорость струи в канале [8, 9]. Подставляя выражения составляющих гидравлического сопротивления в формулу (1), получим

$$\Delta p = \rho_l g h_b + \frac{4\sigma_l}{d_0} + \zeta_1 \frac{\rho_g v_{bp}^2}{2} + \zeta_2 \frac{\rho_g v^2}{2} + \lambda \frac{l_{ch}}{d_{eqav}} \cdot \frac{v_{avp}^2}{2g} + \zeta_l \frac{v_{avch}^2}{2g}. \quad (15)$$

3. Численные оценки

По разработанной методике выполнен расчет гидравлического сопротивления опытного образца струйного барботера с наружным диаметром аппарата 1100 мм и производительностью по очищаемым газам 2300 м³/ч. При заданных значениях $\rho_l, \rho_g, h_b, \sigma_l$, принятых значениях $\zeta_1, \zeta_2, \lambda$ и рассчитанных значениях $d_0, v, v_{bp}, l_{ch}, d_{eqav}$ будем иметь $\Delta p = 1170$ Па, что вполне приемлемо при использовании современных вентиляторов.

4. Заключение

На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований предложенной конструкции струйного барботера, перспективного аппарата для улавливания мелких частиц пыли, включая наночастицы, не улавливаемые рукавными фильтрами, разработана методика расчета одного из основных технологических параметров аппарата – гидравлического сопротивления и выполнен его расчет для разработанного опытного образца аппарата. Разработанная методика рекомендуется для использования при проектировании промышленных струйных барботеров.

Работа выполнена с привлечением аппаратуры Центра коллективного пользования научным оборудованием ЦКП СКГМИ (ГТУ).

Библиографический список:

1. Пат. 2303479 Российская Федерация, МПК⁷ 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.
2. 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.
3. Шильяев, М.И. Методы расчета пылеулавливающих систем / М.И. Шильяев. – М. Форум, 2014. – 320 с.
4. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
5. Молоканов, Ю.К. Процессы и аппараты нефтегазопереработки / Ю.К. Молоканов. – М.: Химия, 1980. – 408 с.
6. Гейер, В.Г. Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
7. Справочник металлста: в 3 т. / ред. Н.С. Ачеркан. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1965. – Т. 1. – 1007 с.
8. Hann, D.B. Study of bubbles entrapped into a gas-sheared liquid film / D.B. Hann, A.V. Cherdantsev, B.J. Azzopardi // International Journal of Multiphase Flow. – 2018. – V. 108. – P. 181-201. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.07.001.
9. Xiao, H. Bubble formation in continuous liquid phase under industrial jetting conditions / H. Xiao, S. Geng, A. Chen, et al. // Chemical Engineering Science. – 2019. – V. 200. – P. 214-224. DOI: 10.1016/j.ces.2019.02.009.

References:

1. Pat. 2303479 Russian Federation, IPC⁷ B01D47/02, B01D3/20. Raspredelitel'naya tarelka massoobmennogo apparata dlya mokroi ochistki gaza [Distribution tray of mass transfer apparatus for wet gas cleaning] / Sverdlik G.I., Vyskrebenets A.S., Ataeva A.Yu.; zayavitel' i patentoobladatel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Severo-Kavkazskii gorno-metallurgicheskii institut (gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet) (SKGMI (GTU)). – № 2006103168/15; zayavl. 03.02.06; opubl. 27.07.07, Byul. № 21. – 7 p. (In Russian).
2. Sverdlik, G.I. Issledovanie parametrov dlya polucheniya pennogo rezhima v struinom barbotere [Research of parameters of a foam in the jet regime bubbler] / G.I. Sverdlik, A.S. Vyskrebenets, R.N. Maxsimov, A.Y. Ataeva // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2017. – I. 9. – P. 430-434. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.430. (In Russian).
3. Shilyaev, M.I. Metody rascheta pyleulavlivayushchikh system [Methods for calculating dust collection systems] / M.I. Shilyaev. – M. Forum, 2014. – 320 p. (In Russian).

4. **Ramm, V.M.** Absorbtsiya gazov [Gas absorption] / V.M. Ramm. – 2-e izd., pererabot. i dop. – M.: Khimiya, 1976. – 656 p. (In Russian).
5. **Molokanov, Yu.K.** Protsessy i apparaty neftegazopererabotki [Processes and apparatuses for oil and gas processing] / Yu.K. Molokanov. – M.: Khimiya, 1980. – 408 p. (In Russian).
6. **Geier, V.G.** Gidravlika I gidroprivod: uchebnik dlya vuzov [Hydraulics and hydraulic drive: textbook for universities] / V.G. Geier, V.S. Dulin, A.N. Zarya. – M.: Nedra, 1991. – 331 p. (In Russian).
7. Spravochnik metallista: v 3 t. [Metalworker's guide: in 3 volumes] / red. N.S. Acherkan. – 2-e izd., pererab. – M.: Mashinostroenie, 1965. – V. 1. – 1007 p. (In Russian).
8. **Hann, D.B.** Study of bubbles entrapped into a gas-sheared liquid film / D.B. Hann, A.V. Cherdantsev, B.J. Azzopardi // International Journal of Multiphase Flow. – 2018. – V. 108. – P. 181-201. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.07.001.
9. **Xiao, H.** Bubble formation in continuous liquid phase under industrial jetting conditions / H. Xiao, S. Geng, A. Chen, et al. // Chemical Engineering Science. – 2019. – V. 200. – P. 214-224. DOI: 10.1016/j.ces.2019.02.009.

Short Communication

PROCEDURE FOR DETERMINING HYDRAULIC JET BARBOTER RESISTANCE FOR COLLECTING FINE DUST

G.I. Sverdlik, A.Yu. Ataeva, A.R. Ataev

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.706

Abstract: North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) has developed a design of a jet bubbler which is based on the patented design of the device main unit – a distribution plate, which allows to implement a foam mode in the bubbler. This dust collector allows you to capture small dust particles (<1 microns), including nanoparticles, that are not captured in bag filters. The article presents a method for calculating the hydraulic resistance of the bubbler, which is required for use, when selecting a fan for the process of dust collection in the bubbler. The hydraulic resistance of the bubbler is defined as the sum of the components: the static pressure of the liquid layer, the capillary drop in the zone of bubbles formation and the resistances of distribution plate parts. The developed method was used in the design of a process line for cleaning gases from pulverized ascents of waelz kiln of zinc production containing nanoparticles.

Keywords: *hydraulic resistance, bubbler, bubbles, nanoparticles, capillary drop, surface tension.*

Свердлик Григорий Иосифович – д.т.н., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Атаева Анжела Юрьевна – инженер-исследователь Центра коллективного пользования, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Атаев Амонд Рафаэлович – студент архитектурно-строительного факультета, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Grigoriï I. Sverdlik – Dr. Sc., Professor of the Department «Technological Machines and Equipment», North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

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

Amond A. Ataev – student of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

Поступила в редакцию/received: 5.07.2020; после рецензирования/revised: 12.08.2020; принята/accepted 16.08.2020.