



А. М. ПАРАМОНОВ
Л. В. МОСТОВЕНКО

**ВАРИАТИВНЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА
В ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОМ ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕ**

VARIABLE BOUNDARY CONDITIONS FOR SOLVING
THE PROBLEM OF MOTION OF A DUSTY FLOW IN
AN INERTIAL-VACUUM DUST COLLECTOR

Объект исследования представлен в виде инерционно-вакуумного золоуловителя (ИВЗ). Существует два вида ИВЗ: первого поколения и второго поколения. На первом эксперимент проведен в 2009 г., на втором – в 2018 г. В установках рассматриваются схожие принципы золоулавливания. Целью написания статьи является выполнение сравнения результатов натурного эксперимента, проведенного на инерционно-вакуумном золоуловителе второго поколения на Омской станции ТЭЦ-4, и данных численного эксперимента, рассчитанных в ANSYS CFX. В граничные условия после первоначальных расчетов внесены корректировки. Данные, полученные в ходе численного эксперимента с уточненными граничными условиями, хорошо коррелируются с натурным экспериментом. Представлены схемы измерений и графические зависимости степени эффективности улавливания от геометрических характеристик золоуловителя.

Ключевые слова: *запыленный поток, инерционно-вакуумный золоуловитель, ANSYS CFX, реламинизация*

Проблема защиты окружающей среды от мелкодисперсных выбросов предусматривает увеличение доли уловленных веществ, загрязняющих атмосферный воздух. В основном существуют два основных источника загрязнения атмосферы: стационарные (промышленные предприятия, топливно-энергетический комплекс, сельское хозяйство, горнодобывающая промышленность) и подвижные (транспорт).

The object of study in this article is presented in the form of an inertial-vacuum dust collector (IVDC). There are two types of IVDC: first generation and second generation. The first experiment was conducted in 2009, and the second in 2018. The plants consider similar principles of dust collection. The purpose of this article is to compare the results of a full-scale experiment conducted on a second-generation inertia-vacuum dust collector at the Omsk TPP-4 station and the data of a numerical experiment calculated in ANSYS CFX. After the initial calculations, adjustments were made to the boundary conditions. The data obtained in the course of a numerical experiment with specified boundary conditions are in good agreement with the full-scale experiment. Measurement schemes and graphical dependences of the degree of capture efficiency on the geometric characteristics of the ash collector are presented.

Keywords: *dusty stream, inertial-vacuum dust collector, ANSYS CFX, relaminization*

Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются теплоэлектростанции, которые потребляют уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы. Под атмосферным загрязнением понимают присутствие в воздухе газов, паров, частиц, твердых и жидких веществ, тепла, колебаний, излучений, которые неблаго-

приятно влияют на растения, животных, человека, климат, материалы, здания и сооружения. Загрязнение атмосферы может происходить как вследствие преобразования ее компонентов, так и переноса загрязняющих веществ из других частей биосферы. Эти процессы могут иметь природный или антропогенный характер. Вещества, попадающие в атмосферу непосредственно из-за человеческой деятельности, обычно относят к антропогенным выбросам и загрязнителям. В атмосферу Земли ежегодно поступает 150 млн. т различных аэрозолей, около 1 км³ пылевидных частиц искусственного происхождения.

Известно множество способов улавливания золы. Несмотря на это, вопрос создания высокоэффективного золоуловителя с долгим сроком работы без выхода в ремонт остается нерешенным. Разработка нового способа улавливания золы – крайне трудоемкая работа, осложненная созданием громоздких дорогостоящих опытных установок, проведением натурных экспериментов на действующих котлах. На сегодняшний день наиболее приемлемыми являются предварительные исследования вновь создаваемых аппаратов на основе численных расчетов с применением программ, таких как ANSYS, позволяющих провести полномасштабный численный эксперимент.

Инерционно-вакуумный золоуловитель (ИВЗ) [1] необходим для эффективного улавливания золы из потока уходящих газов на тепловых электростанциях. Особенность его работы заключается в очистке потока до 99 % объемного расхода газов 150000 м³/ч. Первый полупромышленный образец ИВЗ был испытан в 2009 г. при участии магистрантов Омского государственного технического университета. На него имеется патент – «Инерционно-вакуумный пылеуловитель» № 92358 от 22.10.2009.

Принцип работы ИВЗ первого поколения основан на создании зон разрежения (вакуумического давления) на отдельных участках, хорошо влияющих на улавливание частиц золы. Инерционное золоулавливание состоит в отделении частиц из потока на высоких скоростях. Вакуумическое давление – это давление, численно меньше атмосферного. Оно создается в установившемся режиме работы при отсутствии присосов воздуха в зонах поворотной и золоприемной камер. Дополнительное оборудование для создания разрежения в поворотной камере и бункере не используется.

ИВЗ второго поколения разрабатывался в рамках хозяйственной темы № 15001, исполнителем которой был и автор статьи. Разработчики должны были придерживаться исходных данных заказчика. Гранулометрический состав золы эки-

бастузского угля изменяется по дифференциальной кривой распределения золы (рис. 1).

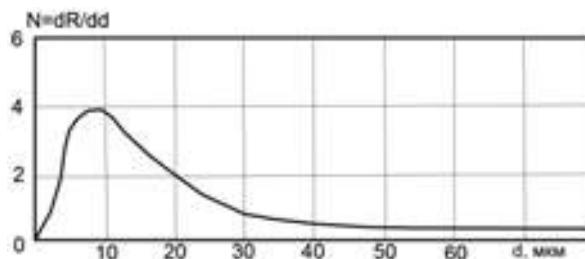


Рис. 1. Дифференциальная кривая распределения частиц золы экибастузского угля по размеру

Объемный расход дымовых газов составляет 150 тыс. м³/ч, запыленность частицами золы потока – 70 г/м³, перепад давления – 66 мм вод. ст. Эти данные являются основными параметрами проведения численного эксперимента, в ходе которого были приняты во внимание особенности поведения запыленного потока в ИВЗ. ИВЗ второго поколения разрабатывался при финансовой поддержке ИНТЕР РАО «ЕЭС» из фонда «Энергия без границ» на основании проведенных численных экспериментов.

В последующем изложении сочетание рассекателя и колец называется направляющим аппаратом.

Согласно рис. 2 инерционно-вакуумный золоуловитель содержит вертикально расположенный двухступенчатый корпус 1, нижняя ступень которого представляет собой золоприемную камеру (ЗПК) 6, а верхняя предназначена для золоотделения и выполнена в виде двух соосно расположенных цилиндрических обечайек 2, 3. Внутренняя обечайка 2 служит входным патрубком 4 для подвода очищаемых дымовых газов, а кольцевое пространство между двумя обечайками – каналом 5 отвода очищенных дымовых газов. Золоотделитель содержит также поворотную камеру (ПК) 8 в нижней части золоотделяющей ступени, сообщающую выход из канала 4 в канал выходного патрубка 5. ПК 8 выполнена с кольцами 12 на крестовине 13, над которым по оси корпуса 1 установлен конусообразный рассекатель 9. Боковая поверхность последнего совместно с нижней частью внутренней обечайки 2 образует конфузорное выходное сопло 10 канала 4. Входной участок 11 кольцевого канала 5 выполнен диффузорным. Высота h рассекателя 9 составляет 0,5–0,8 высоты H внутренней обечайки 2, а угол α сужения конфузорного сопла 10 равен углу повышения степени эффективности β расширения диффузорного участка 11 канала 5 отвода очищенных газов и составляет $\alpha = \beta = (15-20)^\circ$.

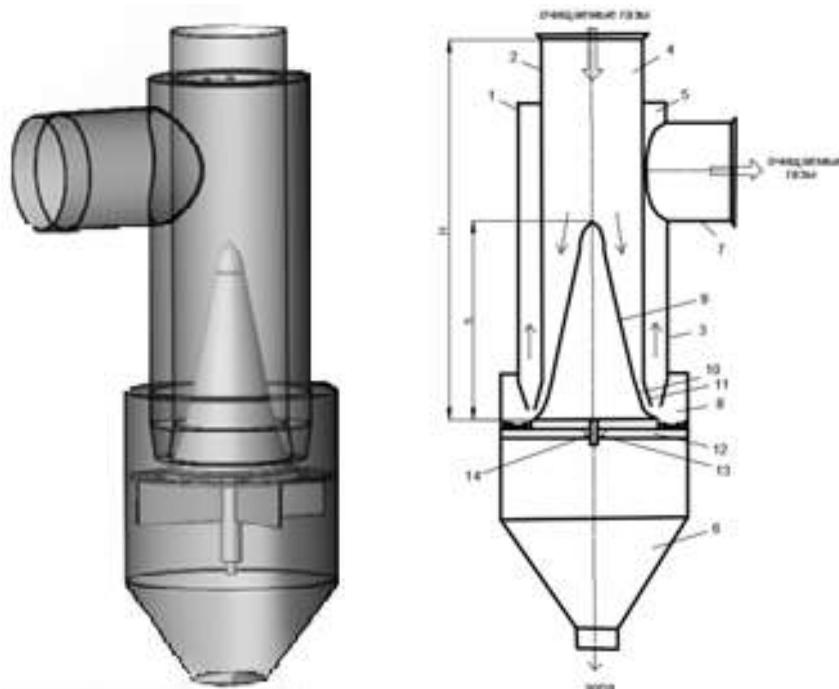


Рис. 2. Инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения: 1 – двухступенчатый корпус; 2, 3 – цилиндрические обечайки; 4 – входной патрубок; 5 – канал для очищенных дымовых газов; 6 – золоприемная камера (ЗПК); 7 – выходной патрубок; 8 – поворотная камера ПК; 9 – рассекатель; 10 – конфузорное выходное сопло; 11 – входной диффузорный участок; 12 – кольца; 13 – крестовина, удерживающая кольца; 14 – ось

Принцип работы ИВЗ следующий. Газ с золовыми частицами через входной патрубок 4 входит в золоуловитель, далее движется по аэроканалу и выходит из разгонного сопла 10. Частицы, приобретая кинетическую энергию вдоль рассекателя 9, по инерции перемещаются в поворотную камеру 8 и за счет силы тяжести осаждаются в бункере 6. Не осаждаются частицы лишь с самыми малыми диаметрами. В ПК 8 образуется аэродинамическая ловушка – частицы имеют возможность попасть в нее, но не могут выйти и впоследствии полностью осаждаются в бункере.

ИВЗ первого поколения (рис. 3) выглядит схоже с аппаратом второго поколения. Отличия: у ИВЗ первого поколения рассекатель меньшей высоты; дополнительно сделано три конфузорных и диффузорных участка; в рассекателе просверлены отверстия для сглаживания пульсаций потока и создания небольшого разрежения в области золowego бункера, ПК, под рассекателем.

В сентябре 2018 г. в Омской области в АО «ТЭК-11» СП «ТЭЦ-4» на котле БКЗ-320-140 проводился натурный эксперимент с ИВЗ. В эксперименте было задействовано следующее оборудование: гравиметрическая система «GRAVIMAT SHC-501»,

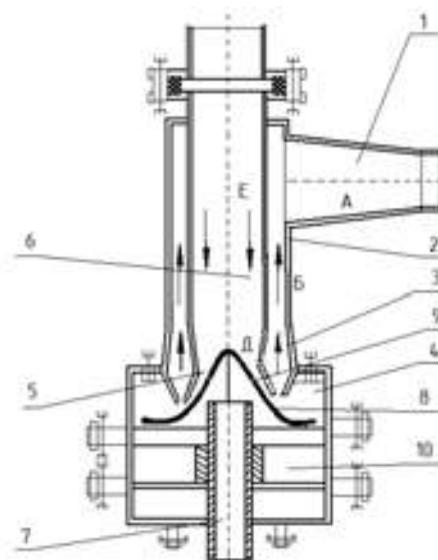


Рис. 3. Схема работы ИВЗ первого поколения: 1 – выходной канал чистого воздуха; 2 – аэроканал подвода воздуха; 3 – разгонное сопло; 4 – поворотная камера (ПК); 5 – патрубок входа загрязненного газа; 6 – входной патрубок; 7 – штанга перемещения направляющего аппарата; 8 – рассекатель; 9 – отверстие в рассекателе; 10 – золотый бункер

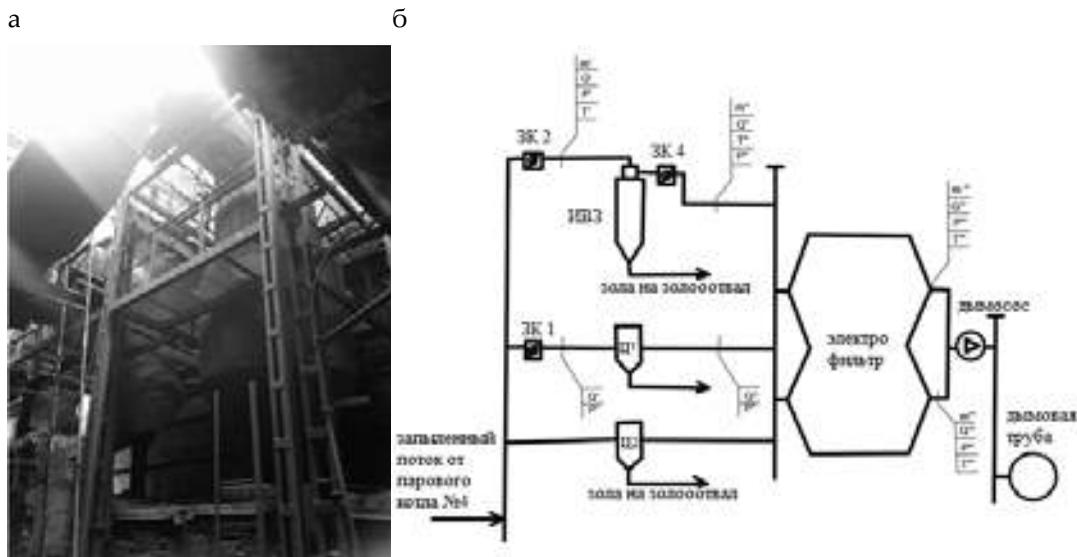


Рис. 4. Инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения:
 а – общий вид ИВЗ второго поколения; б – схема золоулавливающей установки с ИВЗ:
 Ц-1,2 – циклоны; ГЗУ – гидрозолоудаление; ЗК 1,3,4 – запорная арматура; ЭФ – электрофильтр

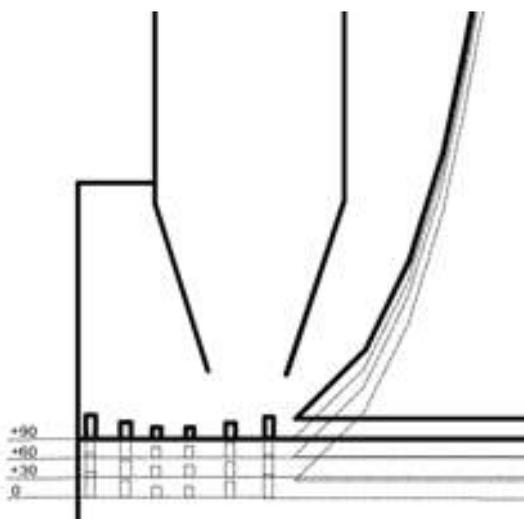


Рис. 5. Схема перемещения раскателя для проведения натурального эксперимента

газоанализатор «Quintox KM 9106», пневмометрическая трубка Прандтля, многофункциональный дифманометр ДМЦ-01. Измерительное сечение в газоходе было выбрано в соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.4.06, ГОСТ 17.2.4.07, ГОСТ Р 50820.

В ходе эксперимента совершались замеры с мерных сечений, указанных на рис. 4. Основные замеры, используемые для верификации математической модели турбулентности по ИВЗ: запыленность несущего потока до и после ИВЗ; сопротивление установки, объемный расход газов до и после ИВЗ; температуры на входе и выходе.

Данные натурального эксперимента были получены при проведении опытов [2] при положении раскателя на отметках, как показано на рис. 5. Чем выше поднимали раскатель, тем больше становилось сопротивление установки [3], меньше объемный расход уходящих газов, больше скорость газов в узком проходном сечении и выше эффективность золоуловителя.

Математическая модель приведена ниже.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0.$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M.$$

Уравнения к-ε модели:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb};$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{kb}).$$

Уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Смещение частицы рассчитывается с использованием прямого интегрирования Эйлера скорости частицы по временному шагу, δt .

Таким образом, $(dx_p/dt) = U_p$, перемещение частицы записывается как

$$x_p^n = x_p^0 + U_p^0 \delta t.$$

Расчет массы частиц на входе и на выходе оценивается как $m = \rho_d \frac{\pi d^2}{6}$, где ρ_d – плотность частицы; d – ее диаметр.

Аналитическое решение уравнения импульса частицы:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_{\text{ali}},$$

где m_p – масса частицы, а F_{ali} принимается как сумма всех сил, влияющих на частицу.

При этом следует определить действующие силы:

$$F_{\text{ali}} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_p + F_{BA'}$$

где F_D – сила аэродинамического сопротивления; F_B – сила тяжести; F_R – сила, обусловленная вращательным движением; F_{VM} – сила, обусловленная ускорением частицы относительно газа; F_p – сила, обусловленная градиентом давления; $F_{BA'}$ – сила Бассэ.

Основные силы, оказывающие влияние на улавливание частиц золы в ИВЗ второго поколения, – это аэродинамическая сила и сила тяжести.

Аэродинамическая сила сопротивления частицы пропорциональна скорости скольжения U_s между частицей и скоростью жидкости:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_s| U_s = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_F |U_F - U_P| (U_F - U_P).$$

Сила тяжести равна весу вытесненной жидкости и определяется как

$$F_B = (m_p - m_F)g = m_p \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_P}\right) g = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_P - \rho_F) g.$$

Аэродинамическая сила F_D пропорциональна значению числа Рейнольдса. Значение силы тяжести F_B необходимо учитывать, так как она влияет на оседание частиц более 5 мкм в золовый бункер. Сила Кориолиса, возникающая при вращении частицы F_R , оказывает большое влияние при высокой турбулентности ($4000 < Re$). Сила градиента давления F_p виртуальная массовая сила FVM, сила Бассэ F_{BA} не учитываются в ANSYS CFX.

Основным показателем, характеризующим работу аппаратов очистки воздуха от пыли, является коэффициент (степень) очистки (эффективность обеспыливания), %:

$$\eta = \frac{m_{\text{ул}}}{m_{\text{вх}}} \cdot 100.$$

По результатам полученных данных оценивались расчеты, на основании которых производилось конструирование золоулавливающего аппарата. Ранее граничные условия фиксировали перепад давлений, скорость, концентрацию золы на входе. При новых численных расчетах граничными условиями на входе стал массовый расход газов $150000 \text{ м}^3/\text{ч}$, концентрация золы $70 \text{ г}/\text{м}^3$; а на выходе – давление 0 Па . Скорости запыленного потока по проточной части были получены в результате численного расчета. Расчеты выполнялись в программном модуле ANSYS CFX [4–8] методом контрольных объемов.

Перерасчет производился по значениям, полученным после изменения высоты поворотной камеры (рис. 6) и высоты рассекателя (рис. 7).

На рис. 6 видно, что изменение высоты поворотной камеры показывает наличие экстремума, после которого увеличивать высоту камеры нецелесообразно. Таким образом, увеличение высоты нецелесообразно и несет за собой лишь бесполезный расход металла.

Хорошую эффективность улавливания в случае «в» можно объяснить тем, что кинетической энергии, набранной прохождением частицы вдоль профиля рассекателя, хватит для того, чтобы пройти ПК, потерять в ПК энергию и переместиться за счет силы тяжести в золовый бункер.

При «а» и «д» результаты были получены неудовлетворительные. Отсутствие ПК приводило либо к тому, что частицы на скорости $60,8 \text{ м}/\text{с}$ движутся напрямую к стенке бункера, в связи с чем может происходить повышенный абразивный износ поверхности, либо большая часть частиц двигались в сторону выхода. Элемент ПК необходим для повышения качества ИВЗ, так как его наличие повышает показатель качества улавливания установки на 30% от варианта «д».

Рассекатель [9], разные высоты которого изображены на рис. 2, – очень важный элемент ИВЗ. Благодаря ему достигается реламиниризация потока [10]. Если его высота невелика, то до середины рассекателя вдоль установки, при больших градиентах скоростей, не происходит сглаживание пульсаций. Увеличение высоты рассекателя приводит к сглаживанию возможных пульсаций потока. Также высота важна для равномерного набора скорости частиц и их последующего инерционного отделения от несущей фазы.

От высоты рассекателя зависит, успеет ли поток, поступающий от входа, набрать необхо-

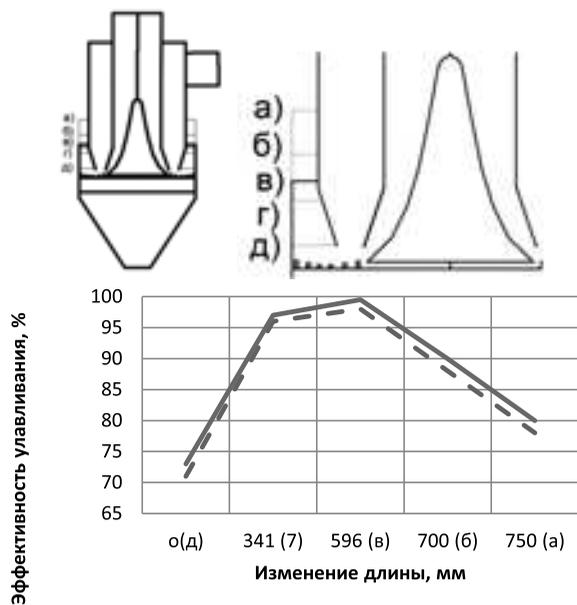


Рис. 6. Схема положения высоты поворотной камеры, при которой были проведены расчеты

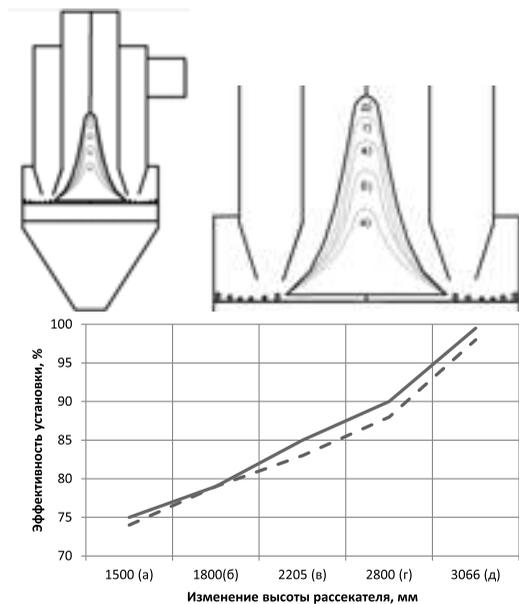


Рис. 7. Варианты изменения высоты рассекателя и эффективность улавливания

димую скорость порядка 60 м/с и разделиться на два самостоятельных потока – золу и газ.

На рис. 6 и 7 приведены две зависимости: сплошная линия – данные численного эксперимента при первичных граничных условиях, пунктирная – данные численного эксперимента с верифицированными по натурному эксперименту граничными условиями. По новым результатам эффективность в обоих случаях стала ниже из-за влияния создающегося разрежения.

Последующая работа с ИВЗ состоит в изменении положения направляющего аппарата относительно отметки его начального положения. Смещение должно производиться за счет перемещения обтекателя на тросе вниз на 1 см. В каждом опыте будет найдена эффективность улавливания золы, объемный расход газов и аэродинамическое сопротивление аппарата. Это необходимо для того, чтобы обнаружить наличие явления реламинизации на отдельных участках. Для этого построены монтажно-настроечные таблицы, в которых установлена взаимосвязь скорости в средней части конфузорного участка на число Рейнольдса. Если значение числа Рейнольдса, вычисленного по толщине потери импульса, попадает в область 500–2000, значит произошла реламинизация потока. В таком случае удастся зафиксировать уменьшенное сопротивление установки.

Выводы. 1. Установлена зависимость влияния степени эффективности улавливания от высоты рассекателя и поворотной камеры.

2. Полученная зависимость при первичных граничных условиях хорошо коррелируется с результатами вторичных граничных условий. Первичные граничные условия были получены в ходе верификации по натурному эксперименту с ИВЗ первого поколения, вторичные – по ИВЗ второго поколения.

3. В результате изучения был получен материал, анализ которого позволил выдвинуть рекомендации для дальнейшего исследования ИВЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазова Л.В., Белоглазов В.П., Градобоев В.Н. Инерционно-вакуумный золоотделитель для дымовых газов // Патент на полезную модель № 175570; бюл. 35 от 11.12.2017.
2. РД 153–34.1–27.301–2001. Методика испытаний золоулавливающих установок тепловых электростанций и котельных. М.: ОАО «ВТИ». 2003. 82 с.
3. Дойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., 2012. 210 с.
4. Florian Meter. Turbulence Modeling for Engineering Flows: ANSYS CFX. 2011. 25 p.
5. Durbin P.A., Reif B.A. Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows, John Wiley & Sons. 2011. 372 p.
6. Серпин Дж. Математические основы классической механики жидкости. М., 2011. 839 с.
7. Fox R.O. Large-eddy-simulation tools for multiphase flows. Annual Review of Fluid Mechanics. 44 (1). 2012. Pp. 47–76.
8. Кэйс В. М. Конвективный тепло- и массообмен. М: Энергия, 1972. 448 с.
9. Белоглазов В.П., Белоглазова Л.В. Влияние высоты рассекателя на эффективность улавливания золы экибастузского угля в инерционно-вакуумном золоуловителе // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 1 (32). С. 46–49.

10. Белоглазов В.П., Мостовенко Л.В. К вопросу о «реламинизации» // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 64–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-64-67.

REFERENCES

1. Beloglazova L.V., e.a. *Inercionno-vakuumnyjzoolotdelitel'dlyadymovyhgazov* [Inertia-vacuum flue gas ash separator]. Patent RF, no. 175570, 2017.

2. Beloglazov V.P., Mostovenko L.V. To the question of «relaminization». *Omskijnauchnyjvestnik* [The Journal Omsk Scientific Bulletin], 2018, no.4, pp. 64–67. (in Russian)

3. Beloglazov V.P., Beloglazova L.V. The effect of the divider heights on the extraction efficiency of Ekibastuz coal in an inertial vacuum ash collector. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Safety and Reliability of Power Industry], 2016, no.1, pp. 46–49. (in Russian)

4. Guidance Document 153–34.1–27.301–2001. Testing method for ash collectors of thermal power plants and boiler houses. Moscow, All-Russia Thermal Engineering Institute Publ., 2003. 82 p.

5. Lojcyanskij L.G. *Mekhanikazhidkostiigaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2012. 210 p.

6. Florian Meter. Turbulence Modeling for Engineering Flows. Canada, ANSYS CFX Publ., 2011. 25 p.

7. Durbin P.A., Pettersson Reif B.A. Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows. United Kingdom, John Wiley & Sons Publ., 2011. 372 p.

8. Serrin J. *Mathematical principles of classical fluid mechanics*. USA, Handbuch der Physik Publ., 1959. 256 p. (Russ. ed.: Serrin J. *Matematicheskie osnovy klassicheskoy mekhaniki zhidkosti*. Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics Publ., 2011. 839 p.)

9. Fox R.O. Large-eddy-simulation tools for multi-phase flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, vol. 1, no. 44. Available at: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-fluid-120710-101118>

10. Keis V.M. *Konvektivnyjteplo-imassoobmen* [Convective Heat and Mass Transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 448 p.

Об авторах:

ПАРАМОНОВ Александр Михайлович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплоэнергетики Омский государственный технический университет 644050, Россия, г. Омск, ул. Мира, 11 E-mail: amparamonov@mail.ru

PARAMONOV Alexander M.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Heat Power Engineering Chair Omsk State Technical University 644050, Russia, Omsk, Mira str., 11 E-mail: amparamonov@mail.ru

МОСТОВЕНКО Любовь Владимировна

старший преподаватель кафедры теплоэнергетики Омский государственный технический университет 644050, Россия, г. Омск, ул. Мира, 11 E-mail: teploblv@mail.ru

MOSTOVENKO Lyubov V.

Senior Lecturer of the Heat Power Engineering Chair Omsk State Technical University 644050, Russia, Omsk, Mira str., 11 E-mail: teploblv@mail.ru

Для цитирования: Парамонов А.М., Мостовенко Л.В. Вариативные граничные условия для решения задачи движения запыленного потока в инерционно-вакуумном золоуловителе // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9, № 4. С. 163–169. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.23.

For citation: Paramonov A.M., Mostovenko L.V. Variable Boundary Conditions for Solving the Problem of Motion of a Dusty Flow in an Inertial-Vacuum Dust Collector. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019. Vol. 9, no. 4. Pp. 163–169. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.23.