Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

# МОСТОВЕНКО Любовь Владимировна

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОГО ЗОЛОУЛОВИТЕЛЯ НА СТЕПЕНЬ УЛАВЛИВАНИЯ ЗОЛЫ

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент

### Парамонов Александр Михайлович

### Официальные оппоненты:

**Зиганшин Малик Гарифович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Института теплоэнергетики;

**Тупоногов Владимир Геннадьевич,** доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника»;

Сергина Наталия Михайловна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве»

Защита состоится «09» октября 2020 года в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.05.12 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  $\Phi\Gamma$ AOУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента Б. Н. Ельцина» https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1222.

Автореферат разослан « »	2020 г.
--------------------------	---------

Ученый секретарь

диссертационного совета

Аронсон Константин Эрленович

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проблема защиты окружающей среды от мелкодисперсных ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ) выбросов предусматривает увеличение доли уловленных загрязняющих атмосферный воздух веществ. Для ТЭЦ при сжигании экибастузских углей эта доля составляет 80–95 %. В одиночных циклонах по ГОСТ 31831–2012 такая высокая эффективность применима для потока частиц золы диаметром свыше 10 мкм. Эффективность циклона с уменьшением диаметра улавливаемых частиц < 5мкм снижается на 10-20 %. Гранулометрический состав золы экибастузского угля изменяется по дифференциальной кривой распределения золы по рисунку 1. Средний медианный диаметр экибастузской золы 5 мкм.

Известно множество способов улавливания золы. Несмотря на это, вопрос создания высокоэффективного золоуловителя с долгим сроком работы 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.

### Степень разработанности проблемы исследования

Существенный вклад в решение теоретических проблем, вопросов экспериментального, математического моделирования движения запыленного потока в программных модулях внесли: S. Elghobashi, Kyle D. Squires, John K. Eaton, Maxey M.R., J.J. Riley, T. Chadha, R. Henniger, G.C. Truesdell, Nishchal Agrawal, George H. Choueiri, Ю.А. Алтухов, Е.М. Пузырев, С.М. Кисляк, Аль Замили Али Джасим, Я.В. Чистяков, Д.Е. Смирнов, А.В. Сугак, В.П. Белоглазов, М.Г. Зиганшин и др.

Однако в опубликованных материалах исследований недостаточное внимание уделено постановке граничных условий при численном моделировании запыленного потока в ANSYS CFX. Большинство ученых занималось исследованиями динамики дисперсных потоков либо в ANSYS Fluent, либо в самостоятельно созданных вычислительных модулях. Особенность данного диссертационного исследования заключается в оценке возможности применения модуля ANSYS CFX для решения задач по расчету эффективности золоулавливающей установки инерционного типа.

**Целью работы** является проведение расчетно-экспериментального моделирования работы инерционно-вакуумного золоуловителя (ИВЗ) и исследование влияния его геометрических характеристик на степень улавливания золы экибастузского угля.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- 1) постановка математической задачи;
- 2) выбор граничных условий, описывающих процесс улавливания золовых частиц;
- 3) проведение верификации выбранной математической модели;
- 4) проведение ряда численных экспериментов, при изменении конструктивных параметров установки (входной, выходной патрубок; рассекатель; поворотные камеры), анализ полученных результатов;
  - 5) предоставление рекомендаций по выбору оптимальных конструкций золоуловителя.

## Научная новизна работы:

1) создание откорректированной модели ИВЗ после проведения натурного эксперимента в тепловой системе «котел – золоуловитель – дымосос – дымовая труба». Новая модель

позволяет при той же эффективности (94-99%) работать с большими расходами дымовых газов 110-150 тыс.  $m^3/4$ ;

- 2) уточнена методика расчета движения запыленного потока в части; установлены взаимосвязь между геометрическими параметрами устройства (высота рассекателя, высота конфузорного участка, высота поворотной камеры, высота колец) и параметрами технологического процесса (эффективность установки);
- 3) выявлен газодинамический эффект явление реламиниризации потока для создания условий увеличения эффективности улавливания золы за счет устранения или уменьшения поперечных пульсаций золовых частиц; эффект достигается при введении рассекателя. При его наличии пульсаций нет. Наличие рассекателя увеличивает эффективность установки на 35%;
- 4) согласование результатов численных экспериментальных исследований процессов золоулавливания с результатами натурных экспериментов.

**Теоретическая значимость результатов** исследования состоит в разработке математической модели и результатах численных экспериментов на ИВЗ.

### Значение полученных результатов исследования для практики

Результаты численного моделирования позволили выбрать оптимальную геометрическую форму отдельных элементов установки, благодаря которым достигнута высокая степень улавливания частиц золы. На базе расчетов данной работы выполнен конструктивный проект золоулавливающей установки и получен акт внедрения от ОАО «ВТИ».

Результаты численного моделирования рабочего процесса и их верификация с полученными экспериментальными данными позволили разработать рекомендации по увеличению эффективности золоулавливающей установки.

Полученные результаты использовались при разработке НИР, которая проводилась совместно с ОАО «ВТИ» при финансовой поддержке фонда «Энергия без границ» (Интер РАО). Результаты исследования применялись для конструирования золоуловителя, установленного на Омской станции ТЭЦ-4.

### Методология и методы диссертационного исследования

Для решения поставленных задач в диссертации использованы основные теоретические положения теории гидрогазодинамики, расчеты химического состава уходящих газов, рассчитывается эффективность золоулавливающего вспомогательного оборудования промышленного котлоагрегата. Численное моделирование выполнено с использованием программных продуктов Microsoft Excel, ANSYS Meshing, CFX (метод контрольных объемов). Верификация используемых моделей турбулентности выполнена на основании полученных автором результатов натурных экспериментальных исследований по аппарату ИВЗ первого поколения для разработки ИВЗ второго поколения.

### На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

- 1) результаты численного эксперимента по определению влияния изменения отдельных участков проточной части ИВЗ на степень улавливания;
  - 2) верификация ИВЗ второго поколения на уже работающем ИВЗ первого поколения;
  - 3) способ моделирования процессов, протекающих в установке;
  - 4) рекомендации по увеличению ресурса работы инерционно-вакуумного золоуловителя.

### Степень достоверности и апробация результатов

Осредненная погрешность натурного эксперимента составила 6%, что связано с погрешностями работы измерительного оборудования. Погрешность численного эксперимента составила 2%.

Основные положения и результаты разработанной расчетно-экспериментальной методики докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: «Техника и

технология нефтехимического производства. Oil and gas engineering 2016» (Омск, 2016); 1-я научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института (Екатеринбург, 2016 г.); «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2016); «Наука и молодежь в XXI веке» (Омск, 2016 г.); «Культура, наука, образование: проблемы и перспективы» (Нижневартовск, 2017); «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2018 г.).

### Публикации

По теме диссертации опубликовано 25 научных статьи, из них 15 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 2 статьи – в журналах, индексированных Scopus и WoS; получен патент РФ на полезную модель «Инерционно-вакуумный золоотделитель для очистки дымовых газов» № 175570. Бюл. 35 от 11.12.2017.

# Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы 165 страниц, в том числе: 143 страницы — основной текст, содержащий 24 таблицы, 83 рисунка, 47 формул; список литературы из 116 наименования на 13 страницах; 2 приложения на 5 страницах.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, отмечается научная новизна, положения, выносимые на защиту, и практическая значимость проведенного исследования.

**В первой главе** представлены основные виды золоулавливающих устройств инерционного типа. Выполнен анализ публикаций по проблеме исследования, в котором упоминаются разработки в области инерционных золоуловителей в России за последние 40 лет. Представлена история создания полупромышленного образца инерционно-вакуумного золоуловителя первого поколения, показаны результаты натурного эксперимента для определения эффективности установки при изменении положения рассекателя в ИВЗ первого поколения. В результате была сформулирована цель по созданию инерционного аппарата с высокой степенью улавливания золы и низким аэродинамическим сопротивлением устройства.

В работе изучено две конструкции золоуловителя:

- 1) инерционно-вакуумный золоуловитель первого поколения (наличие отверстий на рассекателе);
- 2) инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения (отсутствие отверстий на рассекателе, улучшенная конструкция).

Инерционно-вакуумный золоуловитель (ИВЗ) — это золоулавливающий аппарат, предназначенный для эффективного улавливания золы из потока уходящих газов на тепловых электростанциях. Принцип работы ИВЗ первого поколения основан на создании зон разрежения на отдельных участках, влияющих на качественное улавливание частиц золы. Инерционное золоулавливание состоит в отделении частиц из потока на высоких скоростях. Дополнительное разрежение в застойных зонах (на участках поворотной камеры и под рассекателем) позволяет создать вектор скорости частиц малого диаметра по направлению к бункеру. В качестве дополнительного оборудования для создания разрежения используется дымосос.

Первый полупромышленный образец ИВЗ был испытан в 2009 году при участии магистрантов и соискателя Мостовенко Л. В. На него имеется патент — «Инерционновакуумный пылеуловитель» № 92358 от 22.10.2009. В таблице 1 приведены рабочие характеристики этого полупромышленного аппарата.

Далее приведены рабочие характеристики этого полупромышленного аппарата: производительность по очищаемой газовоздушной смеси - 20,4 тыс. м<sup>3</sup>/ч; массовая

концентрация пыли в очищаемом газе на входе -  $1-100 \text{ г/м}^3$ ; аэродинамическое сопротивление - 180 Па; температура очищаемого газа -  $22^{\circ}\text{C}$ .

Принцип работы ИВЗ первого поколения: газ с золовыми частицами через входной патрубок 6 (рисунок 1) по стрелке Е входит в золоуловитель, далее попадает в конфузорное сопло 5. Струя газа после конфузорного сопла разворачивается по стрелке Б. Частицы, приобретая кинетическую энергию, по инерции перемещаются в поворотную камеру 4 и за счет силы тяжести осаждаются в бункере. Не осаждаются частицы с самыми малыми диаметрами. В поворотной камере образуется аэродинамическая ловушка — частицы имеют возможность попасть в поворотную камеру аппарата, но не могут выйти из нее и в конце концов полностью осаждаются в бункере. Таким образом, частицы могут войти в канал, а выйти — нет.

Рассекатель 8 представляет собой обтекаемую выпуклую полую пирамиду с открытым дном. В верхней части рассекателя 8 (рисунок 1) просверлены четыре отверстия 9. Через них газы под рассекателем 8 подсасываются в зону высоких скоростей, располагающуюся над рассекателем.

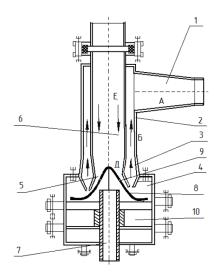


Рисунок 1 – Схема работы ИВЗ первого поколения:

1 — выходной канал очищенного газа; 2, 3 — выходной патрубок; 4 — поворотная камера (ПК); 5 — конфузорный участок; 6 — входной патрубок. 7- штанга перемещения направляющего аппарата, 8- рассекатель, 9-отверстия в рассекателе, 10- золовый бункер.

Было проведено более 400 опытов при различных параметрах (положение рассекателя, изменение массового расхода частиц), после чего были обработаны данные и рассчитаны среднестатистические показатели. Исходное давление в ИВЗ - 101,325 кПа, возникающая в процессе работы разница между первоначальным и установившимся в поворотной камере давлением указана на рисунке 2.

С каждым последующим поворотом червячного редуктора (ось ОХ, рисунок 2) рассекатель поднимался выше. Вследствие этого уменьшалось проходное сечение для хода газов, увеличивалась скорость потока и повышалась эффективность золоулавливающего аппарата (таблица 2).

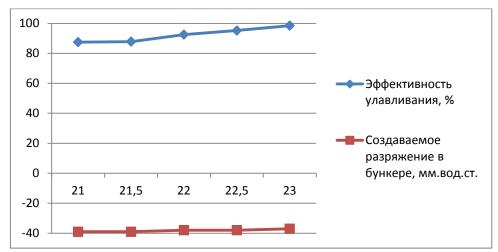


Рисунок 2 – Эффективность улавливания ИВЗ первого поколения в зависимости от разрежения в поворотной камере и положения рассекателя

Стабилизация процесса и высокая эффективность (98,5 %) достигаются при разрежении в бункере 37 мм. вод. ст, созданного дымососом (искусственно) и отдельными элементами (естественно). Замеры давления производились микроманометром, герметично установленным в объем поворотной камеры ИВЗ.

**В главе 2** представлена методика исследования (в виде программы для генерации сетки Meshing, а также расчетного модуля CFX) и математическая модель, используемая при расчетах.

Основными критериями качества сетки являются такие параметры, как orthogonality angle (ортогональность), expansion factor (коэффициент расширения), aspect ratio (отношение площадей соседних ячеек). Важно при моделировании зайти в приемлемые диапазоны по данным значениям: orthogonality angle >20°, expansion factor <20, aspect ratio <100. Тогда сетка и проведенный эксперимент считаются выполненными с минимальными показателями погрешности.

Математическая модель гомогенного потока приведена ниже.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0.$$

Уравнения движения:

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

Уравнения k- $\epsilon$  модели:

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

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\rho U_{i} \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_{i}} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \epsilon + C_{\varepsilon 1} P_{kb}).$$

Уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

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

Смещение частицы рассчитывается с использованием прямого интегрирования Эйлера скорости частицы по временному шагу,  $\delta t$ . Таким образом,  $\left(dx_p/dt\right) = U_p$ , перемещение частицы записывается как

$$x_n^n = x_n^0 + U_n^0 \delta t$$
.

Расчет массы частиц на входе и на выходе оценивается как  $m = \rho_d \frac{\pi d^2}{6}$ , где  $\rho_d$  – плотность частицы, а d – ее диаметр. Аналитическое решение уравнения импульса частицы:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_p + F_{BA},$$

где  $m_p$  — масса частицы, а  $F_{\rm ali}$  принимается как сумма всех сил, влияющих на частицу,  $F_D$  — 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 Бассе.

Основная сила, оказывающая влияние на улавливание частиц золы в ИВЗ второго поколения, это аэродинамическая сила.

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

$$F_D = \frac{1}{2}C_D \rho_F A_F |U_S|U_S = \frac{1}{2} \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) \rho_p A_p |U_F - U_P| (U_F - U_P),$$

 $C_D$  — поправочный коэффициент сопротивления;  $\rho_F$ - плотность газовой составляющей потока, кг/м³;  $A_F$  — площадь, занимаемая частицей, м²;  $U_S$  — скорость скольжения, разность скорости потока  $U_F$  по отношению к скорости частицы  $U_p$ , м/с; Re-число Рейнольдса;  $\rho_p$  —плотность частицы, кг/м³.

Аэродинамическая сила  $F_D$  пропорциональна значению числа Рейнольдса. Значение силы тяжести  $F_B$  не учитывается, т. к. поток частиц мелкодисперсен. Скорость оседания части из-за силы тяжести <0,1 м/с. Сила Кориолиса, возникающая при вращении частицы  $F_R$ , оказывает значительное влияние только при создании крупномасштабных вихрей. Сила градиента давления  $F_P$ , виртуальная массовая сила  $F_{VM}$ , сила Бассэ  $F_{BA}$  не учитываются по причине несущественности из-за отсутствия двухфазности газового потока.

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

$$\eta = \frac{m_{y\pi}}{m_{\text{RY}}} \cdot 100.$$

 $m_{\rm yл}$  — массовый расход уловленных частиц, кг/с,  $m_{\rm BX}$  — массовый расход частиц на входе в установку, кг/с.

**В главе 3** описана верификация движения запыленного потока на установках ИВЗ первого поколения и второго поколения.

Первый пуск полупромышленного образца ИВЗ первого поколения (рисунок 1) совершался при обратном направлении потоков (как в циклоне). Эффективность ИВЗ первого поколения при первом пуске была равна 80 %, но когда вход и выход запыленного потока поменяли местами — сработал принцип работы возвратно-поточного циклона, эффективность увеличилась до 85 %. Преимущество аппаратов данного типа в компактности, а также в направлении движения потока. Частицы изначально направлены в сторону золового бункера. В таком циклоне, чем выше парусность частицы, тем лучше улавливание, это способствует улавливанию частиц <5мкм.

Верификация математической модели для ИВЗ второго поколения проводилась по натурному эксперименту на установке ИВЗ первого поколения с рисунка 1. Перепад давления составляет 380 Па. Эффективность полупромышленного образца ИВЗ первого поколения составляет 85 %, а скорость, развиваемая потоком в самом узком сечении установки, достигает максимум 27 м/с.

Гранулометрический состав золы Экибастузского угля изменяется по дифференциальной кривой распределения золы по рисунку 3. Средний медианный диаметр экибастузской золы 5 мкм.

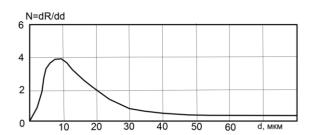


Рисунок 3 — Дифференциальная кривая распределения частиц золы экибастузского угля по размеру.

В результате анализа полученных расчетов было принято решение использовать граничные условия для расчета ИВЗ второго поколения такими же, как и для старой установки, в связи с принципиальной схожестью конструкции обоих аппаратов.

ИВЗ второго поколения разрабатывался в рамках хоз. договорной темы № 15001, исполнителем которой был и автор данной работы. Разработчики должны были придерживаться исходных данных заказчика. Объемный расход дымовых газов 150 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ , запыленность частицами золы потока — 70 г/м $^3$ . Перепад давления 66 мм. вод. ст.

**В главе 4** перечислены все проведенные численные эксперименты, к которым относится изменение геометрических характеристик, таких как высоты отдельных участков и элементов, изменение положения и осенесимметричность направляющего аппарата, а также их влияние на результат эффективности улавливания золы.

На рисунке 4 представлен вид инерционно-вакуумного золоуловителя, на котором была получена наибольшая степень улавливания частиц, порядка 99,5 % по численному эксперименту. Этот образец установлен в рамках этапа № 2 хоз. договорной темы № 15001 между ОАО «ВТИ» и ФГБОУ ВО «ОмГТУ» на Омской станции СП «ТЭЦ-4» АО «ТГК-11».

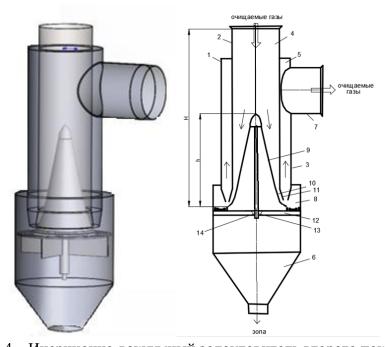


Рисунок 4 — Инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения: 1 — корпус, 2, 3 — цилиндрические обечайки, 4 — входной патрубок, 5 — канал для очищенных дымовых газов, 6 — золоприемная камера (ЗПК),7 — выходной патрубок, 8 —поворотная камера ПК, 9 —рассекатель, 10 — конфузорное выходное сопло, 11 — входной диффузорный участок, 12 —

 –рассекатель, 10 – конфузорное выходное сопло, 11 – входной диффузорный участок, кольца, 13– удерживающая кольца крестовина, 14 - ось.

В последующем изложении сочетание рассекателя и колец принято называть направляющий аппарат. Предназначение колец заключается в отделении поворотной камеры от золового бункера, что позволяет устранить вероятность вторичного уноса золы.

Согласно рисунку 5 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 обечаек 2, 3. Из них 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 которой 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.

Инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения имеет такое название, т. к. патент на изобретение был создан до натурного эксперимента. Ранее было сделано теоретическое предположение о возникновении застойной зоны в ПК и под рассекателем. Это теоретическое предположение не было подтверждено в натурном эксперименте при малых расходах дымовых газов.

# Варианты, проработанные до создания финальной установки в рамках численного эксперимента

Ниже представлена иерархия развития конструкций инерционно-вакуумного золоуловителя (рисунок 5).



Рисунок 5 – Последовательность увеличения эффективности ИВЗ второго поколения

При отсутствии направляющего аппарата, поворотной камеры, колец степень улавливания частиц достигает 50 %. Все дополнительные элементы создают увеличение разрежения по ходу движения уходящих газов, но при этом позволяют увеличить эффективность улавливания установки. При перемещении входного патрубка выше эффективность улавливания увеличивается до 55 %.

Поскольку без дополнительных конструкций не удавалось значительно увеличить степень улавливания установки, было предложено введение рассекателя для уменьшения проходного сечения и равномерного увеличения скорости потока в установке. Рассекатель был заглублен для уменьшения сопротивления установки. Эффективность улавливания при этом возрастала до 90 %. Скорость выдерживалась на 64,5 м/с, скачков ее не было в связи с тем, что рассекатель способствует реламиниризации потока, т.е. по В. М. Кейсу явление, которое возникает в результате обратного перехода из турбулентного режима течения в ламинарный режим. Экспериментально наблюдается в сильно конфузорных потоках жидкости и газа при  $\frac{\partial p}{\partial x} \ll 0$  и относительно небольшой шероховатости стенки (из теплотехнического справочника под редакцией В. Н. Юренева и П. Д. Лебедева без уточнения значений авторов).

Когда в конструкции ИВЗ второго поколения была установлена поворотная камера (ПК), зола стала перемещаться туда по инерции после прохождения самого узкого участка проточной части установки. Далее под действием силы тяжести зола ссыпалась в золовой бункер.

### Перемещение направляющего аппарата в вертикальной плоскости

Направляющий аппарат при проведении численного эксперимента расположен на отметке, при которой на установке достигается лучшая эффективность улавливания. Когда направляющий аппарат перемещен вниз и скорость снижается до 27 м/с, то происходит резкое снижение эффективности улавливания до 40 %. Если же направляющий аппарат перемещать выше, скорость в конфузорном сечении растет, эффективность увеличивается, и растет сопротивление установки.

## Секционный рассекатель

В связи со сложностью исполнения в металле рассекателя сложной вытянутой формы в виде сплошной конструкции было предложено разбить рассекатель на секции. После проведения опытов установлено падение эффективности установки на 5 %. Падение эффективности связано с возникновением дополнительной шероховатости по профилю рассекателя. Она приводит при расчете к развитию в отдельных ячейках расчетной сетки

локальной турбулентности, что негативно сказывается на реламиниризации потока и, соответственно, на сопротивлении ИВЗ второго поколения.

### Влияние высоты поворотной камеры на эффективность улавливания установки

Поворотная камера помогает улавливать частицы за счет их инерционного движения. В ПК частицы золы теряют свою кинетическую энергию и ссыпаются в бункер за счет силы тяжести.

Красная линия зависимости показывает результаты численного эксперимента с граничными условиями после верификации по ИВЗ первого поколения. Синяя линия проходит по граничным условиям, откорректированным по натурному эксперименту ИВЗ второго поколения. В последующих главах представление аналогично.

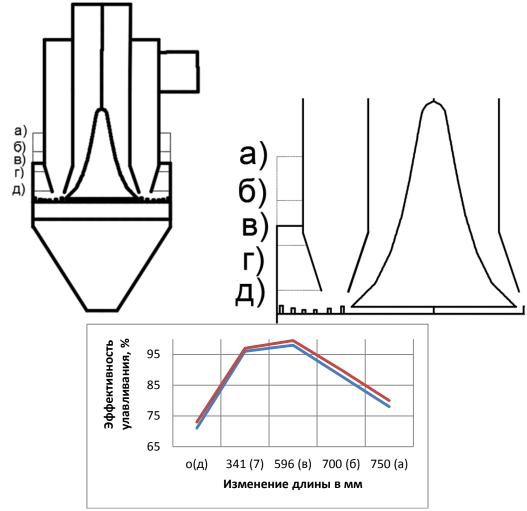


Рисунок 6 – Пять положений высоты поворотной камеры, при которых были проведены расчеты

Хорошую эффективность улавливания в случае в) (рисунок 6) можно объяснить тем, что кинетической энергии, набранной прохождением частицы вдоль профиля рассекателя, хватит для прохождения ПК. Далее в поворотной камере частица эту энергию израсходует и ссыпется в бункер.

При а) и д) (рисунок 6) результаты были получены неудовлетворительные. Отсутствие ПК приводило либо к тому, что частицы на скорости 60,8 м/с движутся напрямую к стенке бункера, в связи с чем может происходить повышенный абразивный износ поверхности, либо большая часть частиц двигалась в сторону выхода. Вариант б) (рисунок 6) хуже из-за того, что максимальная высота траектории движения частицы ограничена положением в) (рисунок 6).

Выше частицы не поднимаются, соответственно положения а) и б) (рисунок 6) несут лишь дополнительный расход металла.

### Влияние высоты рассекателя на эффективность улавливания установки

Благодаря рассекателю достигается реламиниризация потока. Если его высота невелика, то до середины рассекателя вдоль установки при больших градиентах скоростей не происходит сглаживание пульсаций. Так же высота важна также для равномерного набора скорости частицами и их последующего инерционного отделения от несущей фазы.

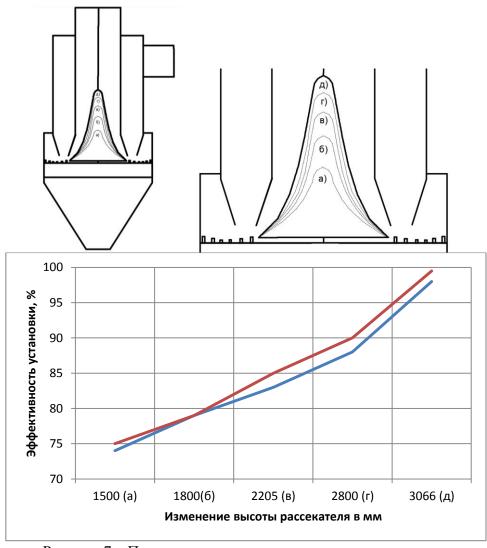


Рисунок 7 – Пять вариантов изменения высоты рассекателя

От высоты рассекателя зависит, успеет ли поток, поступающий от входа, набрать необходимую скорость порядка 66 м/с и разделиться на два самостоятельных потока: золу и газ.

### Влияние высоты колец на эффективность улавливания установки

Под буквами на графике (рис. 8) представлено значение высоты крайних колец, последующие два меньше на 5 мм, средние меньше еще на 5 мм. Всего колец на крестовине шесть.

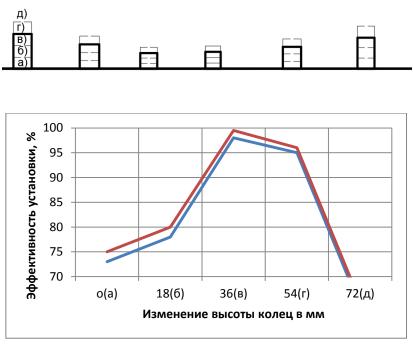


Рисунок 8 – Пять вариантов высоты крайних колец на крестовине в ИВЗ

От рассекателя и до стенки золоуловителя можно отметить сначала уменьшение высоты колец, а после отметки, соответствующей половине высоты свободной крестовины, — ее увеличение. Сделано это для того, чтобы частицы золы двигались вдоль этой изогнутой линии, а часть золы большего диаметра из общей массы, ударяясь о кольца, ссыпалась в бункер. Остальная часть золового потока увлекалась в зону ПК. Недостаточная высота колец (б, в, рисунок 8) приводит к тому, что частицы, проходя входной патрубок, направятся в стенку установки, что привет к скорому истиранию поверхностей и созданию свищей. Свищи и зазоры при сварке конструкции приводят к дополнительным подсосам, увеличению объемного расхода дымовых газов, отсутствию возникновения дополнительных разрежений в установке.

### Влияние высоты конфузорного участка на эффективность улавливания установки

В данной серии численных экспериментов проводилось изменение высоты конфузорного участка, показанного на рисунке 9.

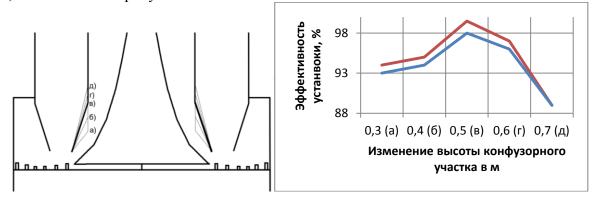


Рисунок 9 – Изменение эффективности в зависимости от пяти высот конфузорного участка

Из проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что конфузорный участок необходимо выполнять определенной высоты (0,5 м). При высоте участка, равной 0,7 м, поток набирает скорость, равную 52,9 м/c, что близко к скорости в 67 м/c, при которой происходит

качественное улавливание. Скорость в 52 м/с поток развивает уже после разворота, а особенность сепарации заключается в достижении скорости около 67 м/с на конфузорном участке перед поворотом на выходной патрубок.

# Осенесимметричность как свойство, нарушающее эффективность улавливания

На рисунке 10, a жирной линией справа обозначена ось. Буквой b представлено расстояние для сдвига направляющего аппарата в сторону относительно оси. Черными линиями обозначены траектории движения золовых частиц, разноцветными — распределение скоростей несущего потока.

В ходе испытаний были получены результаты, которые сведены в график на рисунке 11.

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что зависимость этого влияния неоднозначна, нет стабильного улучшения или ухудшения показателей по мере увеличения сдвига. Любое изменение сечения на выходе из входной трубы приводит к тому, что распределение скоростей по ходу потока становится по обе стороны направляющего аппарата неодинаковым, что ведет к возникновению турбулентных пульсаций.

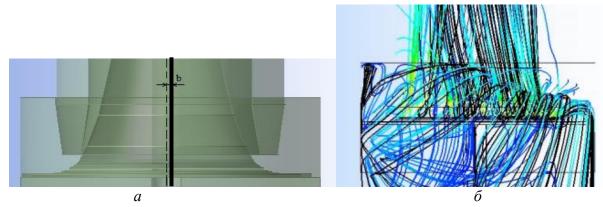


Рисунок 10 — Осенесимметричность направляющего аппарата: a — сдвиг направляющего аппарата от центральной оси на расстояние b;  $\delta$  — неравномерность улавливания золы при сдвиге в 36 мм



Рисунок 11 – График влияния показателя сдвига на степень эффективности улавливания

На рисунке 10,  $\delta$  показано движение потока при максимальном сдвиге в 36,36 мм, это отмасштабированный участок разворота потока с сепарацией частиц. Из цветовой градации

можно отметить, что распределение скоростей происходит неравномерно: где сечение меньше, там скорости больше и очистка газа проходит лучше. А в другом сечении тем временем скорости значительно снижаются и кинетической энергии частиц не хватает на отрыв их от газов.

В пятой главе представлены результаты натурного эксперимента. В сентябре 2018 года был проведен натурный эксперимент на ИВЗ на СП «ТЭЦ-4» АО «ТГК-11» сотрудниками ВТИ с их аппаратурой при нашем участии. В натурном эксперименте было задействовано следующее оборудование: гравиметрическая система «GRAVIMAT SHC-501» (проводит измерение основных параметров газопылевого потока (температура, относительное давление, скорость), концентрацию золы), газоанализатор «Quintox КМ 9106» (предназначен для контроля содержания оксида углерода, кислорода, оксида азота, диоксида азота, диоксида серы, диоксида углерода в промышленных выбросах;), пневмометрическая трубка Прандтля (используется для определения скорости и объемного расхода газопылевых потоков), многофункциональный дифманометр ДМЦ-01 (предназначен для измерения давления, разрежения и разности давлений неагрессивных негорючих газов).

Измерительное сечение в газоходе выбирается в соответствии с требованием ГОСТ 17.2.4.06, ГОСТ Р 50820, РД 153-34.1-27.301-2001. Мерные сечения должны располагаться на прямолинейных, желательно вертикальных, участках газоходов постоянной конфигурации перед золоуловителями и после них. На этих участках не должно быть отложений золы. При использовании для измерений пневмометрических пылеотборных зондов нулевого типа длина прямолинейного участка постоянного сечения должна быть не менее четырех гидравлических диаметров газохода (рисунок 12). При проведении натурного эксперимента технически было невозможно обойтись без погрешности, связанной с замерами на расстоянии четырех гидравлических диаметров, а также с погрешностью самих измерительных относительной приборов. Лючки, производились замеры и отборы проб, располагались, как указано на рисунке 12. Красным выделены области, в которых производились замеры. Несмотря на это все возникающие при натурном эксперименте удовлетворительно корреспондируются погрешности полученными в натурном эксперименте данными.





Рисунок 12 – Установка люков на входе и выходе золоуловителя

Данные, которые были получены в результате натурного эксперимента, приведены в таблице 1. Особенность полученных данных заключается в том, что рядом стоящий циклон, работающий с ИВЗ на одном паровом котле ПК N2 4, был открыт, т. е. объемный расход уходящих газов, вырабатываемый котлом БКЗ-320 направлен на 4 золоулавливающих устройства (на один электрофильтр работает один дымосос, и 2 золоулавливающих аппарата (ИВЗ и циклон)).

В натурном эксперименте проводились замеры, указанные на рисунке 13. Основные замеры, используемые для верификации математической модели турбулентности по ИВЗ второго поколения: запыленность несущего потока (m' и m''); разрежение установки (p' и p''), объемный расход (Q' и Q''); температура на входе и выходе из установки (T' и T'').

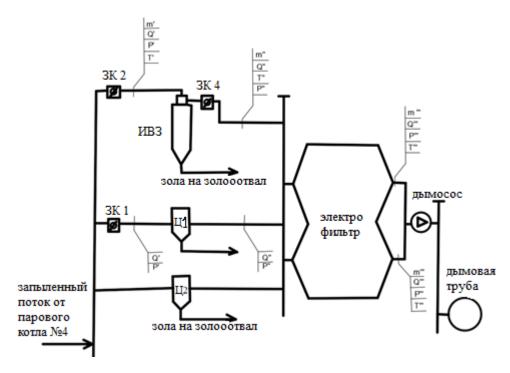


Рисунок 13 – Схема золоулавливающей установки с ИВЗ второго поколения

Данные натурного эксперимента (опыты 1–4, таблица 1) были получены при проведении опытов при положении рассекателя на отметках, как показано на рисунке 14. Чем выше поднимали рассекатель, тем больше становилось сопротивление установки и меньше объемный расход уходящих газов.

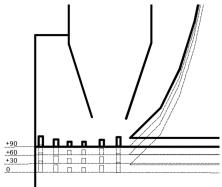


Рисунок 14 – Четыре отметки для проведения натурного эксперимента

В ходе промышленных испытаний установка не достигла значения эффективности в 99 % (таблица 1). Это связано с тем, что паровой котел БКЗ-320, за которым установлен ИВЗ, работает в аварийном режиме. Котел не может выйти на номинальную производительность. В связи с этим не может выделиться проектное количество дымовых газов 150 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ . В испытаниях через ИВЗ второго поколения прошли объемные расходы, равные 20–43 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Таблица 1 – Данные натурного эксперимента

Наименование показателей	Ед.	Опыт 1 (0)		Опыт 2 (+30)		Опыт 3 (+60)		Опыт	4 (+90)
	измер								
	ения	Н.Э.	Ч.Э.	Н.Э.	Ч.Э.	Н.Э.	Ч.Э.	Н.Э.	Ч.Э.
Сопротивление ИВЗ-1	Па	365	368	288	295	187	202	162	166
Объемный расход дым.	Тыс.								
газов перед ИВЗ-1	$M^3/4$	42,5	42,5	28,3	28,3	23,0	23,0	24,3	24,3

				1					1
Эффективность ИВЗ-1	%	44,02	45	48,90	50	63	65	65	68

Примечание. Н.Э. – натурный эксперимент, Ч.Э. – численный эксперимент.

В таблице 2 приведено влияние изменения объемных расходов газа на рабочие параметры установки. Значения в ней рассчитаны по верифицированным по натурному эксперименту граничным условиям. На основании табличных данных можно сделать вывод о том, что достижение высокой эффективности улавливания на ИВЗ второго поколения возможно в диапазоне изменения объемного расхода от 110000–150000 м³/ч. Однако при увеличении объемного расхода газов увеличивается аэродинамическое сопротивление установки. Подобное можно проверить лишь натурным экспериментом. Он покажет наличие явления реламиниризации, позволяющее снизить аэродинамическое сопротивление установки, что в конечном итоге позволит оставить существующие дымососы на котле.

Таблица 2 – Влияние изменения расхода на рабочие параметры ИВЗ второго поколения

Расчетные параметры	Порядковый номер эксперимента										
параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Объемный расход газов, тыс. м <sup>3</sup> /ч	30	40	60	80	100	110	120	130	140	150	
Массовый расход газов, кг/с	10,21	13,61	20,42	27,22	34,03	37,43	40,83	44,24	47,64	51,047	
Массовый расход частиц, кг/с	0,58	0,778	1,17	1,56	1,94	2,14	2,33	2,53	2,72	2,927	
Перепад давления на ИВЗ, Па	296,7	482	620	842	1050	1200	1326	1503	1720	2010	
Эффективность улавливания, %	62	68	69,5	73	78	85	85,7	89	92	93,7	
Скорость потока на входе, м/с	4,72	6,29	9,44	12,58	15,73	17,3	18,87	20,45	22,02	23,59	
Максимальная скорость на конфузорном участке, м/с	36	40	44	58	65	78	86	92	96	102	

На рисунке 15 видно, что результаты эффективности установки корреспондируются с новыми граничными условиями, выявленными после натурного эксперимента на ИВЗ второго поколения. Однако из табл. 2 видно, что при достижении эффективности в 93,7 % при расходе, равном 150000 м³/ч, сопротивление установки увеличивается до 201 мм. вод. ст., что в 3 раза отличается от изначального. Уменьшение данного сопротивления теоретически возможно вследствие появления эффекта реламиниризации.

На рисунке 15 точками отмечены данные, полученные в ходе натурного эксперимента. С увеличением объемного расхода дымовых газов растет скорость в конфузорном сечении, что положительно влияет на увеличение степени улавливания.



Рисунок 15 — Зависимость эффективности ИВЗ второго поколения от изменения объемного расхода запыленных газов

На рисунке 15 приведена зависимость скорости в узком проходном сечении от критерия Рейнольдса, определенного по толщине потери импульса  $Re_{\delta 2}$ . Зависимость определена по скорости в конфузорном сечении, полученной в верифицированных численных экспериментах. По ней можно отслеживать возникновение реламиниризации (диапазон числа Рейнольдса  $Re_{\delta 2} = 500-2000$ ) с последующим уменьшением аэродинамического сопротивления.

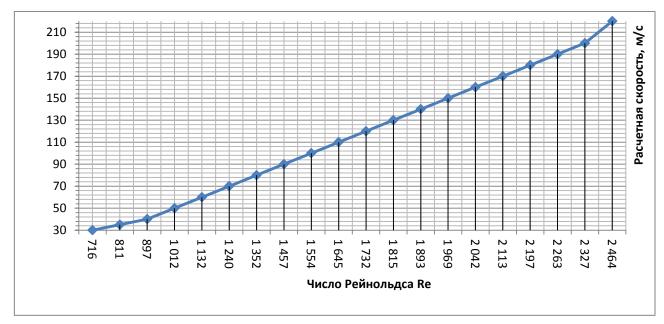


Рисунок 16 – Взаимосвязь скорости в узком проходном сечении и критерия Рейнольдса Re<sub>82</sub>, определенного по толщине потери импульса

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. На основании многих численных экспериментов установлены зависимости степени улавливания золы от геометрических размеров аппарата и от его элементов, просчитаны конструктивные решения установки. Это позволило без дополнительного технического оснащения достичь максимальной эффективности улавливания частиц, а именно:
  - 1) увеличения эффективности аппарата на 25 % благодаря установке рассекателя;

- 2) добавки в 29 % вследствие учета ПК и модернизации рассекателя до принципа направляющего аппарата;
- 3) возможности повышения общей эффективности улавливания золы до 93,7 % с учетом изменения конструкции и появления эффекта реламиниризации.
- 2. Отклонения в работу вносит неосесимметричность и невозможность достижения эффекта реламиниризации при малых расходах запыленного потока. Для лучшей работы аппарата необходимо производить жесткую фиксацию направляющего аппарата, чтобы устранить подобные вариации сдвига. При сдвиге в 36,36 мм можно отметить, что распределение скоростей происходит неравномерно: где сечение уже, там скорость потока больше и очистка газа проходит лучше.
- 3. Проведенная работа позволила сконструировать инерционно-вакуумный золоуловитель второго поколения, получить на него патент и изготовить аппарат, установив его на котел БКЗ-320 ТЭЦ-4 г. Омска.
- 4. Рассчитан диапазон существования явления реламиниризации, что является особенностью ИВЗ. Этим можно объяснить его невысокое сопротивление при сложной проточной части.
  - 5. Представлены рекомендации по дальнейшему исследованию ИВЗ.

# Перспективы дальнейшей разработки темы

Дополнительные исследования передвижения направляющего аппарата в вертикальной плоскости могут показать качественные и количественные изменения по расходу и улавливанию зольных частиц, установить реальный диапазон возникновения реламиниризации.

Возможно сделать отверстия в рассекателе для создания дополнительного эффекта разрежения, как в ИВЗ первого поколения.

Также необходимо проанализировать возможный абразивный износ внутренних поверхностей установки, их влияние на эффективность золоулавливающего аппарата и оценить долговечность работы установки.

**Основные научные результаты**, включенные в диссертацию, опубликованы в следующих работах.

# Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

- 1. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Влияние выходных параметров на степень улавливания золы экибастузского угля в инерционно-вакуумном золоуловителе / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов, Е. В. Неупокоева // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Электротехника. Энергетика. 2014. № 1 (127). С. 167—169. (0,1875 п.л. /0,1 п.л.)
- 2. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Влияние входной скорости в инерционновакуумном золоуловителе на степень улавливания золы Экибастузского угля / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Электротехника. Энергетика. -2014. -№ 3 (133). C. 183–185. (0,1875 п.л. / 0,1 п.л.)

- 3. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Геометрические вариации реальной установки ИВЗУ / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Технические науки. − 2015. − № 1 (137). − С. 128–131. (0,1875 п.л. / 0,1 п.л.)
- 4. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Влияние температуры потока газа на качество улавливания частиц золы ИВЗУ / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Электротехника. Энергетика. 2015. № 1 (137). С. 131–133. (0,1875 п.л. / 0,1 п.л.)
- 5. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Влияние осесимметричности «сомбреро» на степень эффективности улавливания инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко) [и др.] // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Технические науки. -2015. -№ 3 (143). C. 230–232. (0,1875 п.л. / 0,1 п.л.)
- 6. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Влияние высоты рассекателя на эффективность улавливания золы экибастузского угля в инерционно-вакуумном золоуловителе / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Надежность и безопасность энергетики. − 2016. № 1 (32). C. 46–49. (0,25 п.л. / 0,19 п.л.)
- 7. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Влияние высоты колец на эффективность инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Электротехника. Энергетика. 2016. № 1 (145). С. 52–54. (0,1875 п.л. / 0,1 п.л.)
- 8. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Особенности верификации математической модели для течения дисперсного потока в ИВЗ / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Электротехника и энергетика. -2016. -№ 2 (146). -C. 54–58. (0,3125 п.л. / 0,16 п.л.)
- 9. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Теоретический анализ влияния конструкции рассекателя на эффективность инерционно-вакуумного пылеуловителя / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. Секция: Промышленная экология. -2016. -№ 9. -C. 3-5. (0,1875 п.л. / 0,1 п.л.)
- 10. Beloglazova L. V. (Mostovenko L. V.) Theoretical analysis of influence of design parameters of the splitter on the efficiency of inertial vacuum dust collector [Electronic resource] / L.V. Beloglazova (L.V. Mostovenko), V.P. Beloglazov // Chemical and Petroleum Engineering. US: Springer. 2017.  $N_2$  9 (52). Mode of access: https://link.springer.com/article/10.1007/s10556-017-0237-6. 1,375 Mb. Title from screen. (Springer, Scopus).
- 11. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л.В.) Верификация и анализ модели движения запыленного потока в инерционно-вакуумном золоуловителе / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко) // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. Электротехника. Энергетика. -2017. -№ 5. -C. 106-110. (0,3125 п.л.)
- 12. Мостовенко Л. В. К вопросу о «реламиниризации» / В.П. Белоглазов, Л.В. Мостовенко // // Омский научный вестник. Секция: Электротехника. Энергетика. 2018. № 4 (160). С. 64—67. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-64-67. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)
- 13. Mostovenko, L. V. Improving the efficiency of the dust collector [Electronic resource] / L. V. Mostovenko, V. P. Beloglazov // Journal of Physics: Conference Series. 2019. № 1210 Mode of access: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1210/1/012013/pdf. (Web of Science, Scopus). (0,866 M6/ 0,500 M6)

- 14. Мостовенко Л.В. Проведение исследовательских испытаний на инерционно-вакуумном золоотделителе / А.М. Парамонов, Л.В. Мостовенко // Промышленная энергетика. 2019. № 12. С. 43–49. (0,375 п.л. / 0,2 п.л.)
- 15. Мостовенко Л.В. Вариативные граничные условия для решения задачи движения запыленного потока в инерционно-вакуумном золоуловителе / А.М. Парамонов, Л.В. Мостовенко // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 4. С. 163–169. (0,375 п.л. / 0,2 п.л.)

### Патенты

16. Инерционно-вакуумный золоотделитель для дымовых газов : пат. 175570 Рос. Федерация / Л. В. Белоглазова (Л.В. Мостовенко), В. П. Белоглазов, В. Н. Градобоев. — № 2017100591 ; заявл. 12.01.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 35. -3 с.

# Другие публикации

- 17. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Влияние элементов геометрии ИВЗ на эффективность улавливания золы / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Вестник науки и образования. № 7 (9). 2015. С. 5—8. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)
- 18. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Влияние изменения высоты конфузорного участка на эффективность инерционно-вакуумного золоуловителя / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко) // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: УрФУ. 2016. С. 38–40. (0,1875 п.л.)
- 19. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Особенности подбора граничных условий для расчета движения запыленного потока в золоуловителе / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Динамика систем, механизмов и машин. № 1. Т. 2. 2016. С. 323–327. (0,3125 п.л. / 0,2 п.л.)
- 20. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Современные золоулавливающие аппараты инерционного типа / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко), В. П. Белоглазов, П. М. Тоцких // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VI междунар. науч.-практ. конф. (г. Нижневартовск, 13–15 февраля 2017 года). 2017. С. 94–98.(0,25 п.л. / 0,1 п.л.)
- 21. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Анализ математической модели при решении задач с запыленным потоком / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко) // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VI междунар. науч.-практ. конф. (г. Нижневартовск, 13–15 февраля 2017 года). –2017. С. 98–100. (0,1875 п.л.)
- 22. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Разработка инновационного газоочистного оборудования / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко), В. П. Белоглазов // Ученые Омска региону. 2017. С. 220–224. (0,3125 п.л. / 0,2 п.л.)
- 23. Белоглазова Л. В. (Мостовенко Л. В.) Анализ соответствия результатов эффективности ИВЗ, рассчитанных в ANSYS CFX и по расчетным формулам / Л. В. Белоглазова (Л. В. Мостовенко), В. П. Белоглазов, П. М. Тоцких // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Омск: ОмГТУ, 2018. С. 169–172. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)
- 24. Мостовенко Л. В. Повышение эффективности золоулавливающей установки / Л. В. Мостовенко, В. П. Белоглазов // Динамика систем, механизмов и машин. № 3. Т. 6.  $2018. C.\ 125-131.\ (0,375\ п.л./0,1\ п.л.)$

25. Мостовенко, Л. В. Численное моделирование движения запыленного потока в ИВЗ / Л. В. Мостовенко, В. П. Белоглазов // Проблемы машиноведения: мат. III Международ. науч.-техн. конф. – Омск: ОмГТУ, 2019. – С. 264-269.  $(0,3125\ \text{п.л.}/0,25\ \text{п.л.})$