



## УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ УСТАНОВКА ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА НА ТЭС ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ГОРОДСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Замалиева А. Т.<sup>1</sup>, Зиганшин М. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Газпром трансгаз Казань», г. Арск, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

albinazamalieva5@gmail.com

**Резюме:** В соответствии с концепцией развития и модернизации энергетики, совершенствование систем энергообеспечения предприятий ПАО «Газпром» по переработке газа будет направлено на создание высокоэффективных энергетических комплексов и газосбережение путем внедрения новых комбинированных установок на базе газотурбинных установок (ГТУ), обеспечивающих минимальный уровень затрат. Совершенствование инфраструктуры энергетического оборудования газоперерабатывающих предприятий, в том числе систем топливоподготовки, определяет эффективность его эксплуатации. Предлагается усовершенствованная конструкция циклона-фильтра для модернизации линии фильтрации газа системы топливоподготовки с целью повышения надежности работы как инфраструктуры, так и самих энергетических систем и комплексов. Устройство может использоваться для отделения взвесей в пунктах подготовки газа КС и ГРС, в том числе для газотурбинных и парогазовых установок ТЭС. Приведены результаты стендовых испытаний предлагаемой конструкции циклона-фильтра и численных исследований аэродинамических параметров работы циклона на основе методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Аналогичные устройства также могут быть применены для повышения степени очистки от мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  атмосферных выбросов энергетических систем, вследствие уменьшения размера улавливаемых частиц со средних для циклонов и мокрых скрубберов значений порядка 5-10 мкм до 0,5 мкм.

**Ключевые слова:** циклон, фильтр, сепарация, степень очистки, метод моделирования, энергозатраты, топливообеспечение.

**Для цитирования:** Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Усовершенствованная установка фильтрации газа на ТЭС при подготовке топлива для городских энергетических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №5. С.124-131. doi:10.30.724/1998-9903-2019-21-5-124-131.

## IMPROVED INSTALLATION OF GAS FILTRATION AT THERMAL POWER PLANTS IN THE PREPARATION OF FUEL FOR URBAN ENERGY SYSTEMS

AT Zamalieva<sup>1</sup>, MG Ziganshin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC "Gazprom transgaz Kazan", Arsk, Russia

<sup>2</sup>Kazan State energy University, Kazan, Russia

albinazamalieva5@gmail.com

**Abstract:** In accordance with the concept of development and modernization of energy, improvement of energy supply systems of LLC "Gazprom" processing enterprises will be aimed at the creation of highly efficient energy complexes and gas saving through the introduction of new combined units based on gas turbine units (GTU), providing a minimum level of costs. Improving the infrastructure of power equipment of gas processing enterprises, including fuel treatment systems, determines the efficiency of its operation. The improved design of the cyclone filter is proposed for the modernization of the gas filtration line of the fuel treatment system in order to improve the reliability of both the infrastructure and the energy systems and complexes. The device can be used for separation of suspensions at the point of gas preparation of the KS and

*GDS, including for gas turbine and combined cycle power plants TPP. The results of bench tests of the proposed design of the cyclone filter and numerical studies of the aerodynamic parameters of the cyclone based on the methods of Computational Fluid Dynamics (CFD). The distributions of tangential and axial flow velocities in the annular space of the cyclone are obtained in the field experiment. Similar devices can also be used to increase the degree of purification from fine particles of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  atmospheric emissions of energy systems, due to the reduction of the size of the captured particles from the average values for cyclones and wet scrubbers of the order of 5-10 microns to 0,5 microns.*

**Keywords:** *cyclonic filtration, separation, purification degree, numerical simulation, energy, fuel supply*

**For citation:** Zamalieva AT, Ziganshin MG. Improved installation of gas filtration at thermal power plants in the preparation of fuel for urban energy systems. Power engineering: research, equipment, technology. 2019; 21(5):124-131. (In Russ). doi:10.30.724/1998-9903-2019-21-5-124-131.

### **Введение**

В соответствии с Энергетической стратегией на период до 2030 года создание энергетических систем и комплексов с высокоэффективным использованием топливных ресурсов является приоритетным направлением развития энергетического сектора страны. Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) обеспечивает устойчивое функционирование всех сфер деятельности государства, включая экологическое совершенствование производственных технологий, в том числе в энергетических системах самого комплекса.

Важная особенность ТЭК как энергетической инфраструктуры страны, существенно упрощающая системный подход к совершенствованию комплекса по вопросам энергоресурсосбережения и экологичности, заключается в наличии межотраслевой взаимосвязи и возможности оперативного обмена опытом в прогрессивных технологиях между функционирующими в нем топливными и энергетическими объектами. Однако такая особенность задействована еще недостаточно. Так, на объектах ПАО «Газпром», имеющих возможность направить на инновационную продукцию до 10% всех годовых закупок, обновления проводятся не столь же интенсивно, как на объектах энергетики. В то же время ряд авторов признает состояние энергоустановок и энергокомплексов, используемых на технологических объектах ПАО «Газпром», значительно изношенным, и отмечает актуальность задачи существенного повышения их эффективности [1,2].

Концепция развития энергетики ПАО «Газпром» предполагает модернизацию систем энергообеспечения газоперерабатывающих предприятий в направлении сбережения топлива, с созданием высокоэффективных энергетических комплексов за счет внедрения новых комбинированных установок с альтернативными источниками энергии небольшой мощности. При всей актуальности данного тренда здесь не помешал бы опыт энергетической сферы ТЭК, последние десятилетия которой проводятся под знаком глобальной модернизации на базе газотурбинных установок (ГТУ), обеспечивающих практически вдвое меньший уровень топливных затрат. Это уже само по себе снижает выбросы энергетического сектора, и вдобавок может повысить привлекательность применения экологически более чистых, в том числе альтернативных, технологий, которые (за редким исключением) в целом оказываются более энергозатратными, чем традиционные. В то же время модернизация газоперерабатывающих и газотранспортных объектов ТЭК неизбежна, поскольку их энергоемкость в несколько раз выше европейских и американских аналогов. Здесь также, очевидно, было бы полезно обратиться к опыту сферы электроэнергетики ТЭК, которая после отмеченных выше обновлений переместилась в секторе газовой генерации на передовые позиции в мире по всем показателям, включая экологические, с учетом токсичных выбросов и парниковых газов. В процессе модернизации сферы электроэнергетики ТЭК был приобретен опыт использования котлоутилизаторов для низкотемпературных продуктов сгорания после ГТУ, который может принести практическую пользу в области энергосбережения для газотранспортных предприятий ПАО «Газпром», на объектах которого эксплуатируется значительное число ГТУ с температурой отходящих газов порядка 500°C. Более того, подобный опыт касательно объектов электроэнергетики присутствует и непосредственно в самой структуре ПАО «Газпром». Так, например, компанией ООО «Газпром энергохолдинг» проведена

модернизация электростанций г. Москвы, в том числе с газотурбинными циклами. На рис. 1а представлено изменение объема выбросов ТЭС за последнее время по данным ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России (РЭА). Можно видеть тенденцию уменьшения загрязнения воздушного бассейна, что в первую очередь связано с уменьшением потребления газового топлива вследствие перехода на газотурбинные и парогазовые установки (ГТУ и ПГУ).

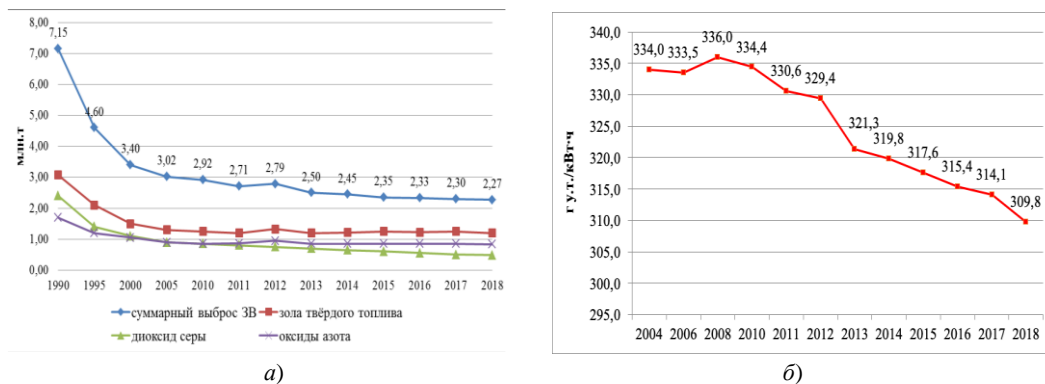


Рис. 1 Основные показатели совершенствования энергогенерации на объектах теплоэнергетики ТЭК: а – выбросы загрязняющих веществ ТЭС [1], б – средневзвешенный удельный расход условного топлива (по данным РЭА)

На рис. 1б представлены также данные РЭА по среднему значению удельного расхода условного топлива (УРУТ) на ТЭС, относимого на отпуск электроэнергии за 2004 – 2018 годы. Целевые показатели по УРУТ при выпуске электроэнергии в обновленной госпрограмме "Энергоэффективность и развитие энергетики" составляют 310 г.у.т./кВт·ч к 2020 году.<sup>1</sup> Очевидно, что в его снижении основную роль играла модернизация оборудования тепловых станций.

Это основной показатель энергоэффективности ТЭС, и поскольку каждый грамм удельного расхода соответствует примерно 2 миллиардам рублей текущей стоимости топлива, модернизация генерирующих мощностей ПГУ/ГТУ в среднесрочной перспективе будет также актуальной. Наибольшую выгоду можно получить увеличением электрической мощности ТЭЦ (не менее чем в 2-2,5 раза) без изменения тепловой нагрузки. Это соответствует потребностям беспрепятственного развития промышленного потенциала Республики Татарстан в ближайшей и среднесрочной перспективе, в связи с чем идет динамичная модернизация генерирующих мощностей и элементов энергетической инфраструктуры. За 2013-2017 годы установленная электрическая мощность в Татарстане увеличилась на 15 % и превысила 8 ГВт, однако он остается энергодефицитным районом. Существенное значение для повышения на оптовом рынке электроэнергии и мощности конкурентоспособности генерирующих объектов Татарстана, включая Заинскую ГРЭС, имеет качество элементов энергетической инфраструктуры. Так, например, после модернизации в 2014 г мощностей на Казанской ТЭЦ-2 (ОАО «Татэнерго») двумя блоками с газовой турбиной PG6111FA (77 МВт, производство GE) и паровой турбиной типа Т-26/36-7,5/0,12 (26,4/36,4 МВт, производство ОАО «Калужский турбинный завод») и с двумя дожимными компрессорными станциями (ДКС) производства Atlas Copco, установленная электрическая мощность станции увеличилась в 2,1 раза, тепловая – на 16%. Опыт эксплуатации последующих лет показал необходимость резервной ДКС для обеспечения ритмичности генерации.

На самом крупном энергетическом предприятии Казани – ТЭЦ-3 (ОАО ТГК-16), в 2017 г. был введен в эксплуатацию построенный в рамках комплексной модернизации новый блок на базе крупнейшей из эксплуатируемых в России (405,6 МВт) газовой турбины 9HA.01 производства GE. После этого установленная электрическая мощность ТЭЦ-3

1. Gosudarstvennaya programma RF «Energoeffektivnost' i razvitie energetiki». Ministerstvo energetiki Rossiyskoy Federatsii. Available at: URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1921>. Accessed to: 22.10.2019.

достигла 790 МВт, установленная тепловая мощность – 2390 Гкал/ч. Казанская ТЭЦ-1 (ОАО «Татэнерго») – старейшая станция Татарстана, построенная и введенная в эксплуатацию еще по плану ГОЭЛРО («КазГРЭС») в 1933 году, имела до последнего времени установленную электрическую мощность 220 МВт, тепловую – 630 Гкал/ч. В августе 2018 г. ТЭЦ-1 состоялся пуск двух блоков по 115 МВт с газовой турбиной производства GE на 77 МВт, паровой турбиной Уральского турбинного завода на 46 МВт и вспомогательным оборудованием, в том числе с дожимными компрессорами, с пунктом подготовки газа и системы его двухступенчатой фильтрации с тремя линиями (одна резервная) на каждой ступени. Сейчас электрическая мощность станции составляет 360 МВт. В перспективе также предусматривается модернизация Заинской ГРЭС с введением до 2024 г. двух блоков ПГУ до 1700 МВт. Также начались испытания новой ГТУ-ТЭС в Елабуге. Ее генерирующее оборудование состоит из четырех газотурбинных установок Solar типа Taurus 60 GS единичной мощностью по 5,6 МВт и четырех водогрейных котлов-утилизаторов. ГТУ ТЭС оснащена системой комплексной газоподготовки, включающей ДКС и блочный пункт очистки газа (БПОГ). БПОГ состоит из трех линий фильтрации и дренажного блока. После обработки поток газа направляется в ДКС с двумя винтовыми компрессорами, компримирующими топливный газ до проектного давления 1,65 МПа.

#### Литературный обзор

Вследствие существенной дороговизны нового генерирующего оборудования проблема эффективности энергетической инфраструктуры для Татарстана (и в целом для модернизируемых и/или проводящих модернизацию мощностей генерирующих объектов ТЭК РФ) заостряется, поскольку отдача от основного оборудования будет во многом предопределена надежностью и качеством работы вспомогательного. Очевидно, что через линии очистки на пунктах подготовки газа (ППГ) для ДКС проскок взвешенных частиц размером от 1 мкм недопустим, поскольку это соизмеримо с допусками обработки рабочих поверхностей винтовых компрессоров. Механические примеси и конденсат в топливном газе воздействуют также на лопатки турбины, КИП и автоматику, и в определенной степени на запорную арматуру и трубопроводы, что ведет к ухудшению показателей генерации. Устанавливаемые при модернизации двухступенчатые системы очистки газа, импортируемые с основным оборудованием, обладают надлежащими показателями очистки, однако резерв энерго- и ресурсосбережения, в том числе за счет упрощения системы очистки, и, следовательно, существенное повышение надежности ее работы, имеется. Здесь для электроэнергетики мог бы оказаться полезным опыт газотранспортных предприятий ТЭК по эксплуатации и модернизации элементов систем подготовки газа с давлением выше 1,2 МПа. Так, в последнее время в системе было принято к рассмотрению предложение по фильтрационной обработке газа, поступающего на ГРС и компрессорные станции, на базе циклонов-фильтров, что обеспечивает требуемую степень очистки и сокращает количество элементов системы без снижения производительности и практически при неизменных энергозатратах на обработку. Аналоги конструкций с подобными эксплуатационными характеристиками в отечественной и зарубежной практике отсутствуют [4-6]. Это показал и анализ имеющихся конструкций аппаратов циклонной фильтрации производственных дисперсных выбросов (см., напр. [7-10]): устройства, обладающие высокой степенью осаждения частиц классов  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , одновременно являются материалоемкими и энергозатратными, а аппараты с низким сопротивлением, и, соответственно, энергоэффективные, имеют невысокую степень осаждения частиц указанных классов.

#### Материалы и методы

С целью повышения надежности работы инфраструктурных элементов энергетических систем и комплексов предложена усовершенствованная конструкция циклона-фильтра, обеспечивающая надлежащую очистку газов в пунктах подготовки газа КС и ГРС от взвешенных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  без существенного увеличения энергозатрат на осаждение взвеси. Для эффективного осаждения мелкодисперсных частиц с минимальными энергетическими и материальными затратами циклон имеет дополнительное устройство – вставку из тканого фильтра. Проведены стендовые испытания циклона-фильтра предлагаемой конструкции [11]. Работа циклона-фильтра (рис. 2) осуществляется следующим образом.

Дисперсный поток попадает в штуцер тангенциального ввода  $I$  со скоростью, значительно превышающей оптимальную для обычного циклона такого же типа, и соответствующей инерционному осаждению более чем на 50% частиц размером 1 мкм и выше, и направляется в циклон. Затем поток проходит вдоль тканевого фильтра 5,

установленного на каркасе *б* в кольцевой части циклона, где происходит касательное и инерционное осаждение пыли. Во избежание проскока частиц после входного патрубка, пространство между основной фильтровальной вставкой и выхлопной трубой перекрыто фильтром *11*. На выходе потока из кольцевой части установлен горизонтально фильтр *12*, предназначенный для финишного улавливания мелкодисперсных частиц, с металлическим элементом *13*, закрепленным на пластине с пружиной *14* и стержнем *15*. Во время регенерации масса скопившейся на металлической части *13* пыли давит на пружину *14*, пластина опускается и накопленная пыль сбрасывается в бункер. Чтобы при регенерации пыль не подсасывалась в выхлопную трубу, металлический элемент *13* закрепляется на складывающемся фильтре *16*. Пыль удаляется через коническое днище *3* и затвор *9*. В ситуации, когда необходим ремонт внутренней части аппарата, освобождают крепежные элементы *10* (например, болты и гайки), и отодвигают коническую часть циклона *3*.

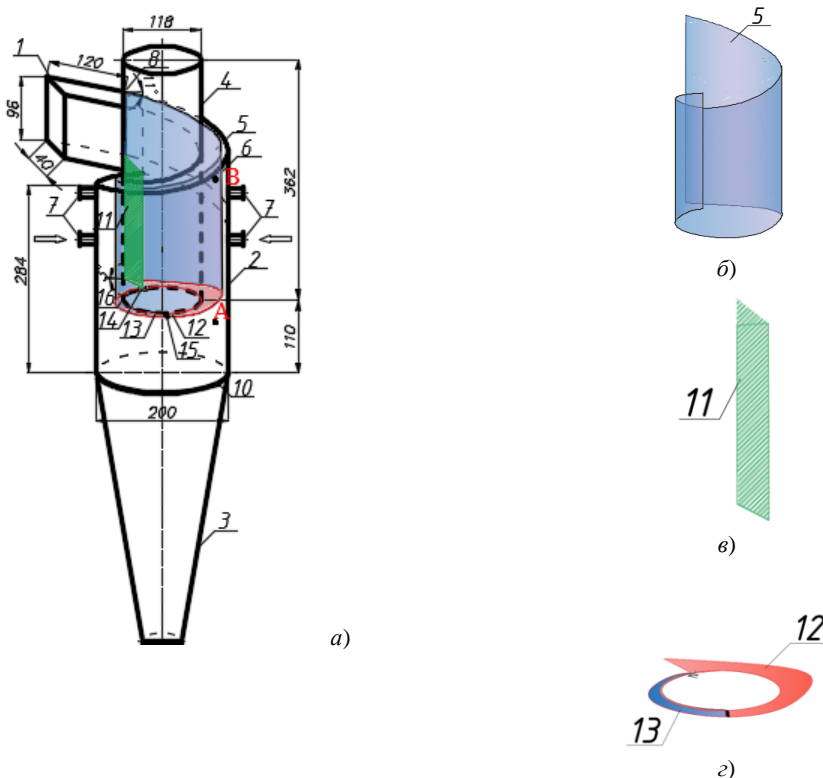


Рис. 2. Схема конструкции циклона-фильтра: *1* – входной патрубок; *2* – цилиндрический корпус; *3* – коническое днище; *4* – выхлопная труба; *5* (*б*) – фильтровальный материал; *6* – металлический каркас; *7* – продувочные штуцера; *8* – торец циклона; *9* – заслонка; *10* – детали крепежа; *11* (*в*) – поперечный фильтр; *12* (*з*) – горизонтальный фильтр, тканая часть; *13* – горизонтальный фильтр, металлическая часть; *14* – пластина с пружиной; *15* – стержень с кольцами; *16* – складывающийся фильтр; *A, B* – порты ввода термоанометра

### Результаты и обсуждение

При испытаниях параметры потока внутри циклона замерялись на нижнем и верхнем уровнях кольцевого пространства, соответствующим позициям портов *A* и *B* на рис. 2. Результаты определения скорости потока в 10 точках по нижнему уровню *A* представлены на рис. 3.

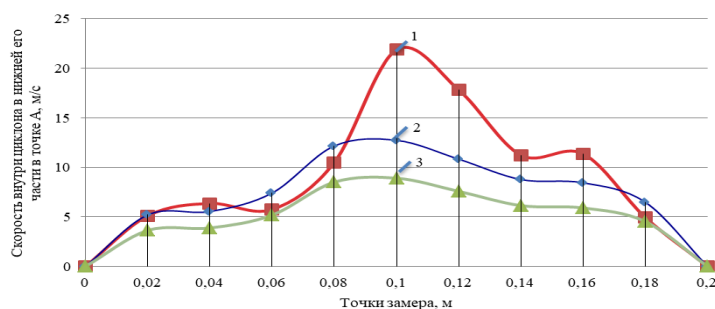


Рис. 3. Распределение тангенциальной (1), осевой (2) и радиальной (3) скоростей потока внутри циклона без предварительного запыления на нижнем уровне кольцевой части (порт А)

Распределения тангенциальных и осевых скоростей потока в кольцевом пространстве циклона получены в натурном эксперименте при помощи термоанемометра *Testo 425*, тогда как замерить радиальную составляющую проблемно из-за искажения измерительной головкой щупа термоанемометра структуры потока в области замеров. Поэтому приведенные на рис.3 значения радиальных составляющих скорости потока в циклоне были получены посредством численного эксперимента на основе методов вычислительной гидродинамики. На сегодняшний день существует множество работ, посвященных моделированию потоков в циклонах на основе *CFD (Computational Fluid Dynamics)* [12-14]. Их авторами наблюдались, как правило, определенные характеристики потока в конкретных модификациях циклонов. В данных численных исследованиях аэродинамических параметров работы циклона-фильтра был использован метод осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (*RANS*) с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса [15], математическая формулировка которой достаточно широко представлена в литературе, например, в работах [16, 17]. В результате численных исследований были получены недостающие в натурных испытаниях радиальные скорости и определены другие параметры потока, валидация которых была проведена по результатам натурных испытаний. В дальнейшем, посредством совмещения соответствующих результатов численных и натурных исследований получены пространственные векторы скоростей потока на уровнях А, В кольцевой части циклона. Они использованы для выстраивания ориентировочной структуры потока средствами *AutoCad* в виде траекторий как касательных к векторам скоростей в сечениях А, В кольцевой части и выхлопной трубы, которые позволили определить расчетным путем инерционные характеристики частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  и степень их оседания за счет инерции и касания. По результатам исследований, эффективность представленного циклона-фильтра составила 99,57% [18], что показывает возможность его использования в качестве окончательной ступени очистки в пунктах подготовки газа КС, ГРС и для газотранспортных предприятий, и для сферы электроэнергетики ТЭК.

#### **Заключение**

Потенциал энергосбережения ТЭР (топливно-энергетические ресурсы) в газоперерабатывающей отрасли составляет около миллиона тонн условного топлива. Внедрение усовершенствованных циклонов-фильтров в технологические схемы переработки углеводородного сырья позволит повысить надежность работы устройств газоочистки, а также сократить потребление энергетических и материальных ресурсов вследствие перехода на одноступенчатую схему очистки. Использование предлагаемого устройства для очистки газов в пунктах подготовки газа КС и ГРС при газовой генерации, а также для очистки атмосферных выбросов систем пылеприготовления ТЭС при угольной генерации, от взвешенных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  и позволит увеличить пропускную способность очистных аппаратов при повышении качества очистки газа с уменьшением диаметра отсекаания (размера частиц, улавливаемых на 50%) со средних для циклонов значений 10 мкм до 0,5 мкм, без дополнительной затраты энергии, что является его преимуществом перед аналогичными устройствами.

#### **Литература**

1. Шапавало А.А. Основные направления развития систем энергетики объектов ПАО «Газпром» в современных условиях // Газовая Промышленность. 2016. №11(745). С. 78-89.
2. Кудинов А.В., Марков Н.Г. Информационные технологии для повышения ресурсоэффективности энергокомплексов нефтегазодобывающих компаний // Вестник науки Сибири. 2012. № 2 (3). С. 64-73.
3. Султангузин И.А., Шомова Т.П., Шомов П.А. Применение тепловых насосов на газоперерабатывающих предприятиях // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2015. №6(162) С. 48-51.
4. Mothilal T., Pitchandi K. Effect of mass flow rate of inlet gas on holdup mass of solid cyclone heat exchanger // Applied Mechanics and Materials. 2014. N 592. pp. 1498-1502.
5. Темникова Е. Ю., Богомолов А.Р., Петрик П.Т. Исследование характеристик циклона с внутренними элементами // Вести Кузбасского гос. тех. унив. 2009. № 2. С. 140-144.

6. Серебрянский Д.А., Захаров А.А., Плашкин С.В. Циклонные пылеуловители. Малозатратная модернизация // *Хімічна промисловість України*. 2013. № 3. С.70-74.
7. Zhao B., Wang D., Su Y. Gas-Particle Cyclonic Separation Dynamics: Modeling and Characterization // *Separation and Purification Reviews*. 2018. pp. 3-31.
8. Chu K. W., Chen J., Wang B. Understand solids loading effects in a dense medium cyclone: effect of particle size by a CFD-DEM method // *Powder Technology*. 2017. N320. pp. 112-174.
9. Азимова Н. Н., Булыгин Ю.И., Купцова И.С. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. №3(90). С. 156-165.
10. Fassani F. L., Goldstein L. A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency // *Powder Technology*. 2000. N 107. pp. 60-65.
11. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г., Потапова Л.И. Об эффективности существующих методов циклонной фильтрации при осаждении мелкодисперсных частиц классов  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  // *Известия КазГАСУ*. 2017. №4(42). С. 415-424.
12. Li X., Song J., Sun G. Experimental study on natural vortex length in a cyclone separator // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2016. N94. pp. 265-298.
13. Chu K. W., Wang B., Yu A. B., et al. CFD-DEM modeling of multiphase flow in dense medium cyclones // *Powder Technology*. 2009. N 193. pp. 235-247.
14. Zhou Z. Y., Kuang S. B., Chu K. W., et al. Assessments of CFD-DEM models in particle fluid flow modeling // *Journal of Fluid Mechanics*. 2010. N 661. pp. 482-510.
15. Osama H., Magdy A. B., Hesham M. E., et al. Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field // *Applied mathematical modelling*. 2017. pp. 81-97.
16. Wang B., Chu K. W., Yu A. B., et al. Modeling the multiphase flow in a dense medium cyclone // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2009. N 48. pp. 3628-39.
17. Зиганшин М.Г. Системы очистки выбросов ТЭС. Часть 2. Оценки эффективности, верификация критериев оценки: Монография. Казань: Издательство КГЭУ, 2013. 212 с.
18. Замалиева А.Т., Зиганшин М.Г. Повышение надёжности, энергетической и экологической эффективности систем газоочистки на ТЭС // *Надёжность и безопасность энергетики*. 2018. №4(11). С. 288-293.

#### Авторы публикации

**Замалиева Альбина Таврисовна** – инженер, ООО «Газпром трансгаз Казань». Email: albinazamalieva5@gmail.com.

**Зиганшин Малик Гарифович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет. Email: albinazamalieva5@gmail.com.

#### References

1. Shapovalov AA. Osnovnye napravleniya razvitiya sistem energetiki ob"ektov PAO «Gazprom» v sovremennykh usloviyakh. *Gazovaya promyshlennost'*. 2016;11(745):78-89.
2. Kudinov AV, Markov ND. Informacionnye tekhnologii dlya povysheniya resursoeffektivnosti energokompleksov neftegazodobyvayushchih kompanij. *Vestnik nauki Sibiri*. 2012;2(3):64-73.
3. Sultangazin IA, Shomova TP, Shomov PA. Primenenie teplovyh nasosov na gazopererabatyvayushchih predpriyatiyakh. *Santekhnika, otoplenie, kondicionirovanie*. 2015;6(162): 48-51.
4. Mothilal T, Pitchandi K. Effect of mass flow rate of inlet gas on holdup mass of solid cyclone heat exchanger. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;592:1498-1502.
5. Temnikova EYu, Bogomolov AR, Petrik PT. Issledovanie harakteristik ciklona s vnutrennimi elementami. *Vesti Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009;2:140-144.
6. Serebryansky DA, Zakharov AA., Vlasihin B. Ciklonnye pyleuloviteli. Malozatratnaya modernizaciya. *Хімічна промисловість України*. 2013;3:70-74.
7. Zhao B, Wang D, Su Y. Gas-Particle Cyclonic Separation Dynamics: Modeling and Characterization. *Separation and Purification Reviews*. 2018;3-31.
8. Chu K. W, Chen J, Wang B. Understand solids loading effects in a dense medium cyclone: effect of particle size by a CFD-DEM method. *Powder Technology*. 2017;320:112-174.
9. Asimova NN, Bulygin YuI, Kuptsova IS. Sravnitel'nyj analiz aerodinamicheskikh harakteristik centrobeznykh pyleulovitelej pri provedenii parallel'nykh sravnitel'nykh ispytaniy. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017;3(90):156-165.

10. Fassani FL, Goldstein LA study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency. *Powder Technology*. 2000;107:60-65.
11. Zamalieva AT, Ziganshin MG, Potapova LI. Ob effektivnosti sushchestvuyushchih metodov ciklonnoj fil'tracii pri osazhdenii melkodispersnyh chastic klassov PM10, PM2,5. *Izvestiya KazGASU*. 2017;4(42): 415-424.
12. Li X, Song J, Sun G. Experimental study on natural vortex length in a cyclone separator. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2016;94:265-298.
13. Chu KW, Wang B, Yu AB, et al. CFD-DEM modeling of multiphase flow in dense medium cyclones. *Powder Technology*. 2009; 193:235-247.
14. Zhou ZY, Kuang SB., Chu KW, et al. Assessments of CFD-DEM models in particlefluid flow modeling. *Journal of Fluid Mechanics*. 2010;661:482-510.
15. Osama H, Magdy AB, Hesham ME, et al. Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field. *Applied mathematical modelling*. 2017:81-97.
16. Wang B, Chu KW, Yu AB, et al. Modeling the multiphase flow in a dense medium cyclone. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009;48:3628-39.
17. Ziganshin MG. *Sistemy ochistki vybrosov TES*. Pt. 2. Ocenki effektivnosti, verifikaciya kriteriev ocenki. Kazan': Izdatel'stvo KGEU. 2013. P.212.
18. Zamalieva AT, Ziganshin MG. Povysenie nadyozhnosti, energeticheskoy i ekologicheskoy effektivnosti sistem gazoochistki na TES. *Nadyozhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2018; 4(11):288-293.

#### Authors of the publication

**Albina T. Zamalieva** – LLC "Gazprom transgaz Kazan", Arsk, Russia. Email: albinazamalieva5@gmail.com.

**Malik G. Ziganshin** – Kazan State energy University, Kazan, Russia. Email: albinazamalieva5@gmail.com.

Поступила в редакцию

13 ноября 2019 г.