
**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ)
ECOLOGICAL SAFETY
(TECHNICAL AND CHEMICAL)**

УДК 66.074.5
DOI 10.48612/ntp/8x15-3un5-mza6

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ
ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ
И ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Р. Я. ИСХАКОВА, А. Г. ЛАПТЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»,
Российская Федерация, Казань
ORCID: 0000-0003-0339-9849, 0000-0002-1626-6458.
Email: imreginaiskh@gmail.com; tv_t_kgeu@mail.ru

В статье рассмотрен процесс термической утилизации избыточного активного ила, образующегося в результате биологической очистки сточных вод промышленных предприятий в топочном устройстве в псевдоожиженном слое. При сжигании избыточного активного ила образуются газообразные продукты сгорания, содержащие токсичные компоненты, такие как диоксид серы, оксиды азота, твердые компоненты. Предложен подход, включающий в себя переработку и вторичное использование отходов, образующихся на предприятиях, при условии очистки газовых выбросов, который позволяет реализовать энергоресурсосбережение, внедрить экозащитные технологии, направленные на сохранение окружающей природной среды и обеспечить экологическую безопасность населения.

Особое внимание уделено процессу очистки газовых выбросов, образующихся при термической утилизации отходов, от дисперсных частиц. Для этого предлагается использовать прямоточный пленочный трубчатый аппарат мокрой очистки газов. Приведено математическое описание модели турбулентно-инерционного переноса и осаждения аэрозольных частиц из газов на межфазную поверхность пленки воды. При использовании данного подхода эффективность сепарации для частиц диаметром более 6 мкм составит 99,9 %.

Ключевые слова: отходы производства, термическая утилизация, избыточный активный ил, газовые выбросы, энергоресурсосбережение, мокрая очистка газов, модель турбулентно-инерционного переноса, эффективность очистки, экологически безопасная технология

**IMPROVEMENT OF THE GASES EMISSIONS PURIFICATION METHODS IN THERMAL
DISPOSAL OF SLUDGE AND WASTE FROM INDUSTRIAL ENTERPRISES**

R. Ya. ISKHAKOVA, A. G. LAPTEV

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan State Power Engineering University»,
Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan
Email: imreginaiskh@gmail.com, tv_t_kgeu@mail.ru

The article considers the process of thermal disposal of excess activated sludge formed as a result of biological treatment of wastewater from industrial enterprises. The approach, which includes recycling and secondary use of waste generated at enterprises, allows to implement energy conservation, introduce eco-protective technologies aimed at preserving the natural environment and ensuring environmental safety of the population. Particular attention is paid to the process of cleaning gas emissions generated during thermal utilization of waste from dispersed particles. The using of a straight-through tubular wet gas cleaning device is proposed. A mathematical description of the model of turbulent-inertial transfer and deposition of aerosol particles from gases onto the interphase surface of a water film is given. The separation efficiency for particles with a diameter of 6 μm will be 99.9 %.

Key words: industrial waste, thermal utilization, excess activated sludge, gas emissions, energy and resource conservation, wet gas cleaning, turbulent-inertial transfer model, cleaning efficiency, environmentally friendly technology

Введение

В настоящее время особую актуальность приобретают проблемы экологической безопасности и сохранения окружающей природной среды. Одной из ключевых задач в данном направлении является утилизация отходов [1]. Многоотоннажные отходы представляют собой отходы промышленного производства или потребления. Их хранение, складирование и переработка связаны с различными проблемами, такими как: загрязнение окружающей природной среды; угроза здоровью населения; нарушение естественных ландшафтов и уничтожение мест обитания животных и растений; утрата ценных ресурсов и прочие [2].

Одним из примеров подобных отходов является осадок систем канализования и водоотведения – избыточный активный ил, представляющий сообщество микроорганизмов, участвующих в процессе окисления растворенных примесей сточных вод [3]. Традиционным подходом к его обработке является размещение обводненного осадка на иловых полях для дальнейшей сушки в естественных условиях. Однако, применение данной технологии осушки приводит к различным негативным последствиям: отчуждению больших площадей и земель, которые впоследствии становятся непригодными для сельскохозяйственного назначения; риску возникновения загрязнений близлежащих водных объектов через грунтовые воды, распространению неприятного запаха, неблагоприятной санитарной обстановке и прочим [4, 5].

Анализ последних исследований и публикаций

Известны различные способы утилизации осадка сточных вод. Однако, присутствие в сточных водах токсичных соединений ограничивает возможность его дальнейшего использования, например, в качестве удобрения для почв [6]. При решении вопросов защиты окружающей среды, в частности от вредного влияния твердых и газообразных отходов, перспективным является путь комплексного энерготехнологического использования осадков сточных вод в качестве вторичных энергетических ресурсов при условии очистки газовых выбросов, образующихся в процессе сжигания [7]. При этом перспективным является совместная термическая утилизация с прочими компонентами. Так авторы предлагают проводить совместное сжигание активного ила и бурого угля [8]. Сжигание избыточного активного ила обладает сочетанием нескольких преимуществ, которые

отсутствуют в других альтернативах обработки, включая значительное сокращение объема избыточного активного ила до стабилизированной золы, которая составляет всего 10 % от объема механически обезвоженного ила, и термическое разрушение токсичных органических компонентов [9]. Однако, при термической утилизации остро встает вопрос, связанный с очисткой газовых выбросов, образующихся после термической утилизации [10]. Одним из компонентов являются дисперсные частицы, попадающие в газовые выбросы. Размер частиц может существенно варьироваться, поэтому применение эффективных методов очистки является актуальной задачей.

Частицы мелкодисперсной пыли являются значимым фактором антропогенного загрязнения атмосферы, значительную долю которого формируют выбросы при сжигании твердых топлив. Находясь в воздушной среде, аэрозоли способны проникать в глубокие отделы респираторной системы человека, вызывая негативные последствия для здоровья населения. Эксплуатация систем термической утилизации также обуславливает возникновение ряда экологических рисков. Во избежание указанных негативных эффектов используются разнообразные методы газоочистки, включая сухие и мокрые электростатические осадители, а также скрубберы различной конструкции.

Так, например, отечественными авторами [11] разработан прямоугольный сепаратор, оборудованный несколькими рядами двутавровых элементов, в котором основным механизмом является центробежная сила при обтекании газовым потоком контактных устройств. Также [12] применяются электрофильтры с вращением электродов для снижения удельного электрического сопротивления. Представлена математическая модель процессов в электрофильтре с вращающимся электродом на основе применения уравнения Эйлера-Лагранжа. Существуют решения, направленные на повышение эффективности систем пылеулавливания с вихревыми инерционными аппаратами на встречных закрученных потоках [13].

Поэтому разработка и совершенствование методов, технологий и средств снижения негативного воздействия антропогенной хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду, а также их математическое описание является важной и необходимой задачей [14, 15].

Цель статьи: Разработка эффективного метода и математической модели очистки газовых сред от дисперсных веществ,

образующихся в процессе термической утилизации осадков и отходов производства, обеспечивающих экологическую безопасность утилизации избыточного активного ила.

Материалы и методы исследования

В научном исследовании использовали методы физического и математического моделирования. Экспериментальные исследования проводили с использованием осадка биологической очистки сточных вод – избыточного активного ила, отхода энергетики – шлама водоподготовительных установок тепловых электрических станций (ВПУ ТЭС) и связующим – лигносульфонатом техническим.

Избыточный активный ил совместно с шламом ВПУ ТЭС направляются на гранулирование, продуктом которого являются топливные гранулы диаметром 5-7 мм методом окатывания. Связующим компонентом выступает технический лигносульфонат, гранулы готовят в массовом соотношении 9:1:3 (% масс.) (избыточный ил: шлам: связующее). Гранулы заданного диаметра разработаны для транспортировки пневмотранспортными системами и обеспечения точности количества введенного топлива в процессе сжигания. Выбор связующего обусловлен теплотворной способностью, сцепляющими свойствами и экологической безопасностью.

Проведен CHNS – анализ гранул, который реализован динамическим методом Дюма-Прегля, состоящим в высокотемпературном сжигании пробы с последующим разделением в насадочной газохроматографической колонке и детектированием продуктов сгорания при помощи высокочувствительного катарометрического детектора автоматизированного элементного анализатора EA-3000, Eurovector, S.p.A. в течении не более 5 минут.

Шлам ВПУ ТЭС представляет собой отход следующего химического состава (% масс.): карбонат кальция CaCO_3 – 71,0 %, гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – 8,5 %; гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ < 1,0 %; диоксид кремния SiO_2 – 0,6 %, остальные прочие вещества – 19,0 %, определенный путем рентгенографического качественного фазового анализа с применением дифрактометра D 8 ADVANCE (Bruker)[16]. В шламе присутствуют гуминовые вещества – до 15,0 % масс.: на его поверхности имеется типовой набор функциональных групп гуминовых веществ: гидроксильной группы, иминогруппы, метильной, метиленовой групп, ароматических связей, карбоксильных групп и спиртовых групп, определенных с помощью газовой хроматомасспектрометрии на приборе Thermo Scientific DFS (условия: колонка DB-1, 30 м, 0,25-0,25;

время анализа 46 мин; температура термостата 120-280 °С, скорость нагрева 6 °С/мин, выдержка при 280 °С 20 мин; температура инжектора 280 °С; температура интерфейса 280 °С; скорость потока 1,0 мл; диапазон масс 50-500 а.е.м.; скорость сканирования 1 с).

Для обработки результатов измерений и вычисления погрешностей оценки измеряемой величины использован ГОСТ Р 8.736-2011. При проведении вычислительного эксперимента применялось компьютерное моделирование.

Результаты исследования и их обсуждение

Термическая утилизация отходов производства. Предложена технология термической утилизации избыточного активного ила совместно с шламом водоподготовительных установок тепловых электрических станций (ВПУ ТЭС), который повышает водоотдающую способность избыточного активного ила и позволяет рассматривать его в качестве вторичного энергетического ресурса. Разработанный процесс переработки избыточного активного ила методом термической утилизации в псевдоожиженном слое, включающий стадию предварительного обезвоживания сырья, а также дальнейшую рекуперацию тепла отходящих газов и очистку газов от продуктов сгорания, отображен на схеме (рис. 1). [16].

Результаты расчета материального баланса представлены в табл. 1.

Процесс сжигания топливных гранул, поступающих из накопительного бункера 6, осуществляется в топочном устройстве в псевдоожиженном слое. Топка с псевдоожиженным слоем 8 предназначена для термической деструкции обезвоженных осадков и встроена в конструкцию котлоагрегата тепловой электростанции. Принцип работы топочного устройства основан на явлении «кипения» слоя материала, создаваемого восходящим потоком газовой фазы, что обеспечивает интенсивную турбулизацию гранул и их «витание» по всему объему топки. Подача песка как инертного материала из емкости для хранения песка 7 обеспечивает стабилизацию температурного режима процесса. Выбран инертный материал с высоким значением теплоемкости, равным 0,835 кДж/(кг·К).

В процессе «кипения» реализуется значительное перемешивание топливных частиц, окислителя (воздуха), инертного материала и продуктов сгорания, что дает возможность не использовать механические перемешивающие устройства. Процесс горения при пуске установки производится с помощью подачи природного газа.

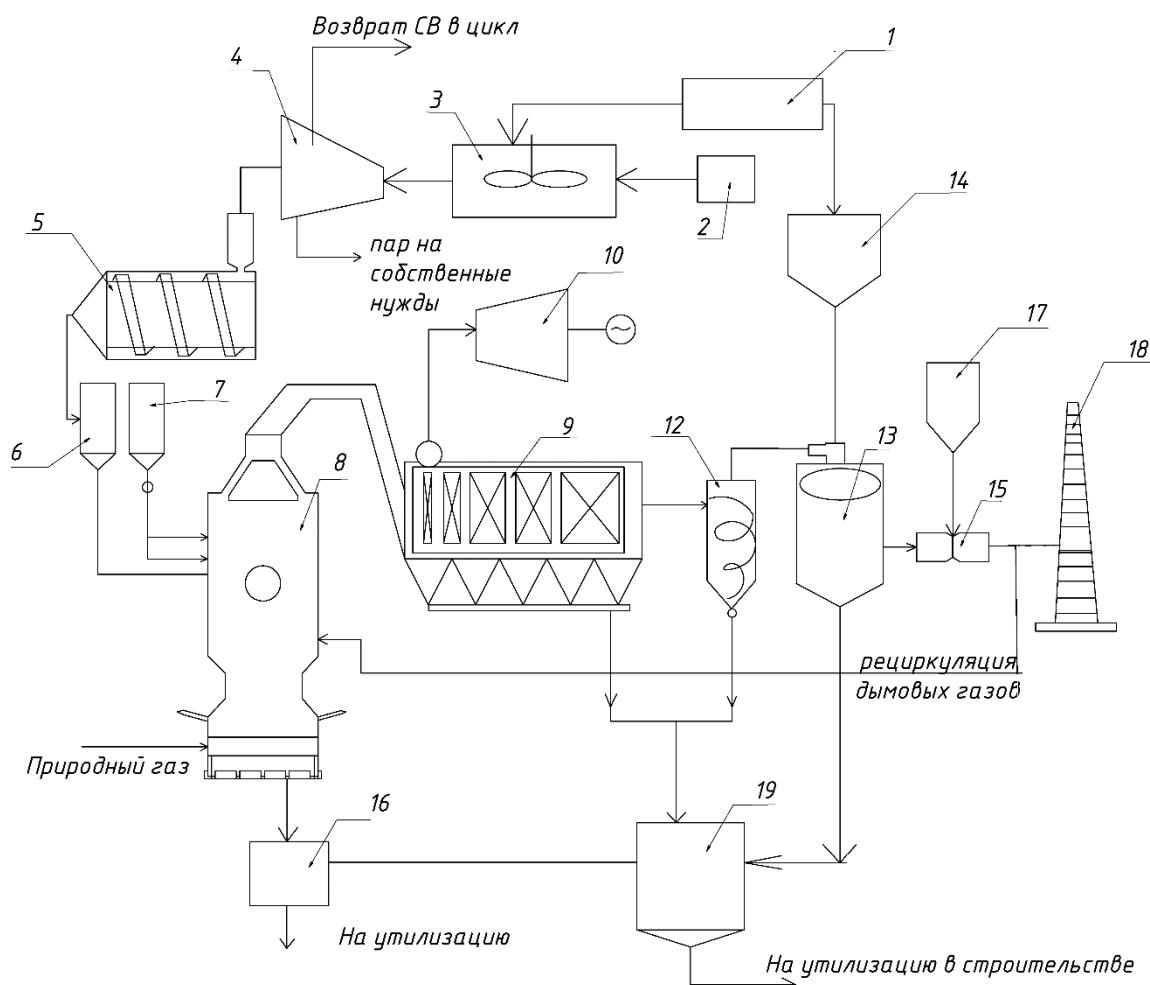


Рис. 1. Технологический процесс подготовки и термической утилизации топливных гранул:
 1 – шламонакопитель; 2 – илонакопитель; 3 – бункер-смеситель; 4 – декантационный сепаратор;
 5 – экструзионный гранулятор; 6 – бункер-накопитель готовых гранул;
 7 – емкость для хранения песка; 8 – топка с псевдоожиженным слоем; 9 – экономайзер;
 10 – турбина; 11 – генератор электрического тока; 12 – циклонный сепаратор;
 13 – мокрый скруббер; 14 – емкость для приготовления суспензии;
 15 – аппарат сорбционной доочистки; 16 – бункер золошлаковых отходов;
 17 – бункер активного угля; 18 – дымовая труба; 19 – бункер для сбора продуктов газоочистки.

Таблица 1. Результаты расчета материального баланса

Показатель	Значение
Массовый расход топливных гранул, поступающих на сжигание, т/сут.	16,81
Концентрация золы в продуктах сгорания, кг/кг	0,0621
Объемный расход паров воды, образующихся при сжигании гранул, м ³ /кг	0,404
Объемный расход продуктов сгорания, образующихся при сжигании гранул, м ³ /кг	3,2047
Максимальный размер уносимых частиц золы из кипящего слоя, мм (при скорости псевдоожижения 2,5 м/с)	0,33
Объемный расход дымовых газов, образующихся при сжигании топливных гранул, м ³ /с	0,608

Продукты сгорания с температурой 850-900 °С направляются в экономайзер 9, где происходит нагрев химически обессоленной воды с выработкой пара. Полученный пар приводит в действие турбину 10, которая, в свою

очередь, вращает ротор генератора электрического тока 11 для выработки электроэнергии. Часть пара отбирается для теплофикационных нужд предприятия.

Охлажденные до температуры 200-250 °С дымовые газы подаются на схему газоочистки с системой фильтрации для очистки от взвешенных частиц и аппарат адсорбционной очистки для тонкой очистки газовых выбросов.

Очистка дымовых газов, образующихся после термической утилизации. Очистка газовых выбросов после термической утилизации избыточного активного ила является важным компонентом экологической безопасности при реализации данного решения утилизации осадка очистных сооружений. Его состав

включает органические вещества, азотистые соединения, сероводород и другие примеси. При сгорании образуются газообразные продукты сгорания, содержащие токсичные компоненты, такие как диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), твердые компоненты, полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны.

Сепарация твердых дисперсных частиц происходит в циклонах. Валовые выбросы загрязняющих компонентов в дымовых газах представлены в табл. 2.

Таблица 2. Валовые выбросы загрязняющих компонентов в дымовых газах

Показатель	Значение
Валовый выброс твердых частиц в дымовых газах после улавливания в батарейном циклоне, т/год	48,788
Валовый выброс оксида углерода, т/год	124,407
Валовый выброс оксидов азота в пересчете на диоксид азота, т/год	9,52
Валовый выброс оксидов серы в пересчете на диоксид серы, т/год	114,73
Валовый выброс ПХДД/ПХДФ, т/год	1,717

Охлажденные дымовые газы направляются в циклоны 12 для вывода золы и сепарации инертного материала. Далее очистка происходит в распыливающем адсорбере 13 путем сорбции кислых газовых компонентов – хлористого водорода, оксидов серы и азота, а также частичного разложения полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов. Сорбентом является шлам водоочистки ТЭС, поступающий из шламонакопителя 1 [17].

На выходе из адсорбера температура газовой среды имеет значение 140 °С. Последующая доочистка от стойких органических загрязнителей, включая диоксины и фураны, происходит за счет ввода мелкодисперсного активированного угля из бункера 17 через аппарат сорбционной доочистки 15.

Концентрация оксидов азота в выбросах снижается с применением технологии рециркуляции дымовых газов. 20-30 % газового потока возвращается в зону горения топки котла с циркулирующим кипящим слоем 8, где происходит их термическое и каталитическое восстановление.

После прохождения всех стадий очистки обработанные газы выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу 18.

Математическое моделирование и разработка аппарата мокрой очистки газов от твердой фазы. При этом особое внимание следует уделить очистке газовых выбросов после адсорбционной очистки активированным углем. В газовый поток также попадает

оставшаяся зола-уноса, а также непрореагировавший шлам и продукты химических реакций.

Для очистки газа от тонкодисперсных частиц активированного угля, золы и непрореагировавших компонентов можно использовать различные технические решения, например, вихревые контактные элементы, шероховатые каналы, каналы с дискретно-регулярной шероховатостью и др. Представляется целесообразным применение высокоскоростных (10-40 м/с) контактных устройств с восходящим или нисходящим движением пленки жидкости (воды) и очищаемого газа. Причем нисходящий прямоток характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением, чем восходящий. Кроме этого, удалять загрязненную воду в таком аппарате проще. Схема такого аппарата представлена на рис. 2. Схема взаимодействия фаз представлена на рис. 3.

Газовый поток с дисперсной фазой поступает в аппарат через верхний патрубок (рис. 2), где также через боковой штуцер подается вода, которая распределяется по поверхности вертикальных трубок 2 в виде нисходящей пленки и транспортируется газовым потоком в нижнюю часть 3, где за счет силы инерции оседает с уловленной дисперсной фазой в эллиптическом днище и далее выводится через нижний патрубок. Очищенный газовый поток меняет свое направление движения на 180°, поднимается в верхнюю часть аппарата по кольцевому каналу и выводится через боковой штуцер.

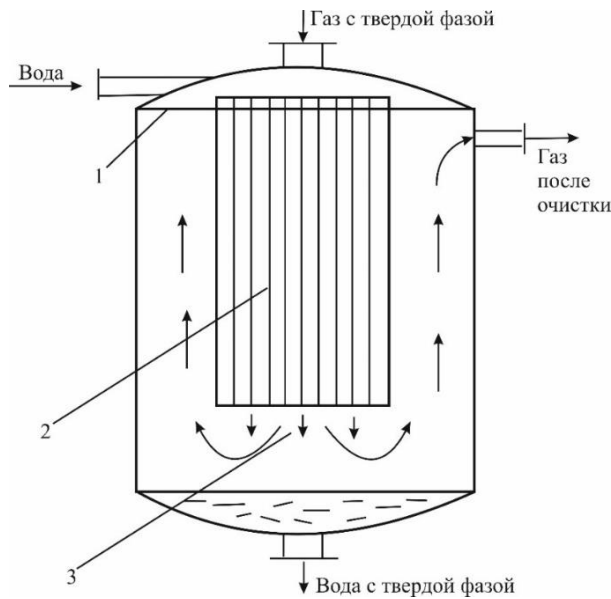


Рис. 2. Схема прямооточного аппарата очистки газов:

- 1 – трубная решетка;
- 2 – прямоточные элементы;
- 3 – инерционная зона

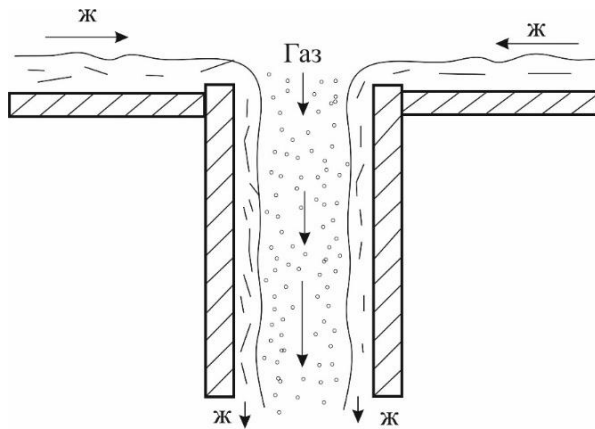


Рис. 3. Схема взаимодействия фаз

Высокоскоростной поток газа с пленкой жидкости характеризуется режимом сильного взаимодействия фаз, когда касательное напряжение трения $\tau_{г-ж}$, Па, значительно больше на стенке $\tau_{ст}$, Па, без учета взаимодействия с газом. В таком режиме применима модель турбулентно-инерционного переноса и осаждения аэрозольных частиц из газов на межфазную поверхность пленки воды. Подробно эта модель рассмотрена в работах [18, 19], где основным параметром является коэффициент скорости турбулентно-инерционного механизма, т.е. турбулентная миграция частиц к стенке (или межфазной поверхности) канала. Наибольшее применение получили выражения Медникова В. П. для расчета скорости турбулентной миграции u_t^+ в безразмерной форме [20]:

$$u_t^+ = u_t / u_* \quad (1)$$

где u_t – скорость турбулентной миграции частиц, м/с;

u_* – динамическая скорость, м/с.

при $\mu_p^2 \tau^+ \leq 16,6$

$$u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\tau^+}{1 + \omega_E \tau_p} \right)^2, \quad (2)$$

при $\mu_p^2 \tau^+ > 16,6$

$$u_t^+ = 0,2, \quad (3)$$

где $\mu_p = \frac{1}{(1 + \omega_E \tau_p)^{0,5}}$ – безразмерный параметр;

τ_p – время релаксации для частицы, с;

$\omega_E = u_* / (0,05 d_3)$ – частота энергоемких пульсаций, с⁻¹;

d_3 – эквивалентный диаметр канала, м;

$\tau^+ = \tau_p u_*^2 / \vartheta_\Gamma$ – безразмерное время релаксации частиц;

ϑ_Γ – кинематический коэффициент вязкости газа, м²/с.

В приведенных выражениях не учитывается гравитационный и продольно-диффузионный механизмы переноса ввиду их относительной малости.

В эмпирических формулах различных авторов установлена квадратичная зависимость $u_t^+ = A(\tau^+)^2$ [18-20], где A – коэффициент пропорциональности, находится экспериментально.

Коэффициент скорости турбулентной миграции частиц $u_t = u_t^+ u_*$ зависит от динамической скорости u_* или касательного напряжения на стенке, $\tau_{ст}$:

$$u_* = \sqrt{\tau_{ст}/\rho_r}, \quad (4)$$

где ρ_r – плотность газа, кг/м³;

$\tau_{ст} \sim f(\Delta P_{г-ж})$, $\Delta P_{г-ж}$ – потеря давления газа, Па.

Динамическая скорость на поверхности раздела фаз пленки при взаимодействии с газом в цилиндрическом канале определяется из уравнения баланса сил:

$$\tau_{г-ж} F = \Delta P_{г-ж} S, \quad (5)$$

где $S = \pi(d - 2\delta_{ж})^2/4$ – площадь поперечного сечения канала, м²;

d – диаметр трубки, м;

$\delta_{ж}$ – средняя толщина пленки, м;

$F = \pi(d - 2\delta_{ж})H$ – площадь поверхности раздела фаз, м²;

H – длина канала, м;

$\Delta P_{г-ж}$ – потеря давления, Па.

Из выражения (5), учитывая, что $\tau_{г-ж} = u_*^2 \rho_r$, получим

$$u_* = \sqrt{\frac{\Delta P_{г-ж}(d - 2\delta_{ж})}{4\rho_r H}} \quad (6)$$

где перепад давления газа в орошаемом канале находится экспериментально [21].

Например, при нисходящем прямотоке известны зависимости для удельного перепада давления в трубке, представленные на рис. 4.

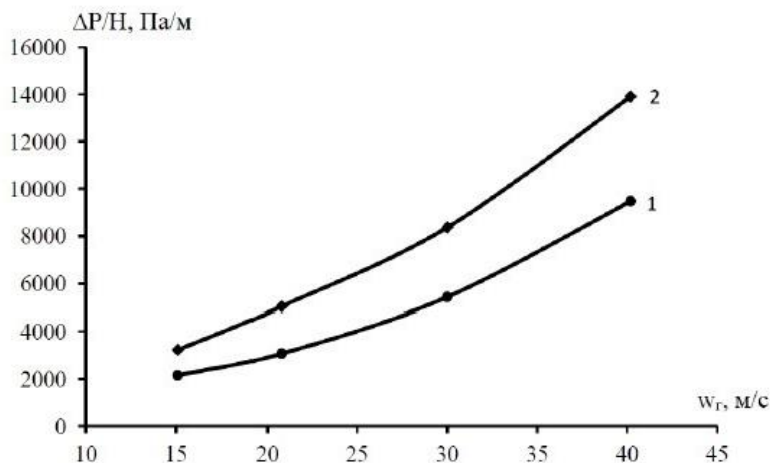


Рис. 4. Перепад давления в нисходящем осевом потоке.
1 – удельный расход воды 1,13 м³/(м·ч);
2 – 2,39 м³/(м·ч).
Точки – экспериментальные данные Булкина [21] для трубки диаметром $d = 0,0168$ м (погрешность экспериментальных данных составляет 4-5 %)

Расчет показывает, что при скорости газа $w_r = 20$ м/с и удельном расходе жидкости в пленке $q_{ж} = 1,13$ м³/(м·ч) имеем перепад давления $\Delta P_{г-ж} = 2400$ Па/м для трубки диаметром $d = 0,021$ м и значение динамической скорости $u_* = 3,54$ м/с; $\delta_{ж} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м.

Степень сепарации, η можно вычислить по выражению [18-20]:

$$\eta = \frac{C_H - C_K}{C_H} = 1 - \exp\left(-\frac{4u_t H(d - 2\delta_{ж})}{d^2 w_r}\right), \quad (7)$$

где C_H, C_K – начальная и конечная концентрация частиц, мг/м³.

Для частиц 3 мкм и 6 мкм имеем $\tau_p = 1,39 \cdot 10^{-5}$ и $\tau_p = 5,55 \cdot 10^{-5}$. Соответственно получены значения $\tau^+ = 9,6$ и $\tau^+ = 38,6$.

Для частиц диаметром 3 мкм имеем $u_t = 0,214$ м/с и диаметром 6 мкм имеем $u_t = 0,708$ м/с. Тогда сепарационная эффективность при длине контактной трубки $H = 1,0$ м для 3 мкм $\eta = 0,864$ и для 6 мкм $\eta = 0,998$. Как следует из расчетов сепарационная эффективность частиц активированного угля довольно высокая при диаметре более 3 мкм, а при более 6 мкм достигает 0,999.

Расход газа в одной контактной трубке $V_1 = \frac{w_r \pi d^2}{4} = 6,9 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Общий расход газа на очистку $V_r = 0,6$ м³/с (табл. 1), тогда число трубок $n = \frac{V_r}{V_1} = 87$ шт. с внутренним диаметром $d = 0,0021$ м и наружным 0,025 м. Мощность на подачу газа $N = \Delta P_{г-ж} V_r = 1,44$ кВт. С учетом входных и выходных патрубков получим не

более $N = 2,0$ кВт. Диаметр внутреннего корпуса $D_{\text{кв}} = 0,375$ м; наружного корпуса $D_{\text{кн}} = 1,1$ м; высота аппарата $H = 1,6$ м; скорость газа в кольцевом сечении принята $1,0$ м/с.

Расход воды составит значение $V_{\text{ж}} = q_{\text{ж}} \pi d n = 6,48 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$). После сепаратора требуется установка небольшого проточного отстойника с тонкослойными элементами. Так как разность плотностей активированного угля, золы и непрореагировавших компонентов ($\rho_{\text{г}} \approx 500 \text{ кг}/\text{м}^3$) и воды ($\rho_{\text{г}} \approx 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$) достаточно сильно отличается, то разделение фаз не представляет трудностей.

Если температура газа выше температуры воды, то кроме сепарации будет происходить процесс охлаждения газа. Метод расчета тепловой эффективности такого процесса представлен в работе [22].

Выводы

В данной работе представлен подход обработки осадка сточных вод путем термической утилизации и очистки газовых выбросов, образующихся при применении избыточного активного ила в качестве топлива. Разработанная

комплексная технология дает возможность повысить энергоресурсосберегающий эффект при вторичном применении осадков сточных вод с рекуперацией тепла отходящих газов после процесса сжигания активного ила и доочисткой газовых выбросов до нормативных значений.

Для очистки газов от дисперсных примесей, а также полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов применяется высокоскоростной контактный скруббер с нисходящим потоком жидкости (воды) и очищаемого газа, содержащего дисперсные включения. Предлагаемый сепаратор улавливает частицы 3 мкм с эффективностью около $86,5 \%$, а частицы диаметром 6 мкм с эффективностью $99,8 \%$. Таким образом, предлагаемая технология является экологически безопасной и представляет интерес для промышленных предприятий и предприятий жилищно-коммунального сектора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 25-29-00129, <https://rscf.ru/project/25-29-00129/>

Список литературы

1. Калыгин В. Г. Промышленная экология. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 423 с.
2. Md Tareq Rahman, Abbas Mohajerani, Filippo Giustozzi. Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. Materials, 2020, vol. 13, pp. 1495.
3. Гринин А. С., Новиков В. Н. Промышленные и бытовые отходы: Хранение, утилизация, переработка. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. 332 с.
4. Phosphate recovery using activated sludge cyanophycin: Adsorption mechanism and utilization as nitrogen-phosphorus fertilizer / Jinyu Zeng, Duoduo Chen, Jing Zhu [et al.]. Chemical Engineering Journal, 2023, vol. 476, no.11, pp. 146607.
5. Towards hydrogen production from waste activated sludge: Principles, challenges and perspectives / Qizi Fu, Dongbo Wang, Xiaoming Li [et al.]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, vol. 135, issue 1, pp. 110283.
6. Джумабекова Л. Б., Хабарова Е. И. Способы утилизации избыточного активного ила – отхода биологической очистки сточных вод // Академическая публицистика. 2018. № 4. С. 13–22.
7. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. Т.3. Калуга: Изд-во Бочкаревой, 2003. 1024 с.

8. Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS / M. Otero, C. Díez, L. F. Calvo [et al.]. Biomass and Bioenergy, 2002, vol. 22, issue 4, pp. 319–329.

9. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions of typical sewage sludge incineration treatment route based on two case studies in China / Yang Yang, Yali Guo, Ning Fang [et al.]. Environmental Research, 2023, vol. 231, issue 1, pp. 115959.

10. Gaseous emissions from sewage sludge combustion in a moving bed combustor / L. Batistella, V. Silva, R. C. Suzin [et al.]. Waste Management, 2015, vol. 46, pp. 430–439.

11. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева [и др.] // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 78–80.

12. Касимова Б. Р., Баубек А. А., Кусатаева А. К. Разработка математической модели электрофильтра с вращающимся осадительным электродом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. Т. 322. № 2. С. 147–150.

13. Самойлова Е. Э., Лысикова Т. Д. Совершенствование технологии очистки газовых выбросов производства асфальтобетонных смесей // Вестник ДонНУ. 2023. № 5 (163). С. 98–102.

14. Тугов А. Н. Современные технологии термической переработки твердых

коммунальных отходов и перспективы их реализации в России (обзор) // Теплоэнергетика. 2021. Т. 1. С. 3–20.

15. Шейх А. А. Анализ влияния процесса переработки отходов строительства на величину загрязнения атмосферного воздуха // Вестник ДонНАСА. 2022. № 5 (157). С. 56–61.

16. Исакова Р. Я., Нургалиев А. И. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. Т. 8 (2). С. 26–36.

17. Николаева Л. А., Исакова Р. Я. Адсорбционная очистка газовых выбросов отходом производства от оксидов азота // Наука и техника в газовой промышленности. 2023. № 1 (93). С. 99–106.

18. Сугак Е. В., Войнов Н. А., Николаев Н. А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. 2-е изд. Казань: Отечество, 2009. 224 с.

19. Лаптев А. Г., Башаров М. М., Лаптева Е. А. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. 2-е изд. Издательство: ТНТ, 2025. 288 с.

20. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 378 с.

21. Лаптев А. Г. Гидромеханические процессы в аппаратах химической технологии. СПб: Издательство «Лань», 2024. 592 с.

22. Лаптев А. Г., Лаптева Е. А. Математическая модель тепломассообмена и сепарации аэрозолей в осевых и закрученных дисперсно-кольцевых потоках газа и жидкости // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98. № 4. С. 1105–1114.

References

1. Kalygin V. G. *Promyshlennaya ekologiya* [Industrial ecology]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2007. 423 p.

2. Md Tareq Rahman, Abbas Mohajerani, Filippo Giustozzi. Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials*, 2020, vol. 13, pp. 1495.

3. Grinin A. S., Novikov V. N. *Promyshlennye i bytovye othody: Hranenie, utilizaciya, pererabotka* [Industrial and household waste: Storage, disposal, processing]. Moscow: FAIR-PRESS, 2002, Russia.

4. Phosphate recovery using activated sludge cyano-phycin: Adsorption mechanism and utilization as nitrogen-phosphorus fertilizer / Jinyu Zeng, Duoduo Chen, Jing Zhu [et al.]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 476, no.11, pp. 146607.

5. Towards hydrogen production from waste activated sludge: Principles, challenges and perspectives / Qizi Fu, Dongbo Wang, Xiaoming Li [et al.]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 135, issue 1, pp. 110283.

6. Dzhumabekova L. B., Khabarova E. I. Sposoby utilizacii izbytochnogo aktivnogo ila - othoda biologicheskoy ochistki stochnyh vod [Methods for excess active sludge - waste from biological wastewater treatment disposal]. *Akademicheskaya publicistika*, 2018, issue 4, pp. 13-22.

7. Timonin A. S. *Inzhenerno-ekologicheskij spravochnik. T. 3* [Engineering and environmental reference book. Vol. 3]. Kaluga: Izd-vo Bochkarovoy, 2003. 1024 p.

8. Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS / M. Otero, C. Díez, L. F. Calvo [et al.]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, vol. 22, is-sue 4, pp. 319–329.

9. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions of typical sewage sludge incineration treatment route based on two case studies in China / Yang Yang, Yali Guo, Ning Fang [et al.]. *Environmental Research*, 2023, vol. 231, issue 1, pp. 115959.

10. Gaseous emissions from sewage sludge combustion in a moving bed combustor / L. Batistella, V. Silva, R. C. Suzin [et al.]. *Waste Management*, 2015, vol. 46, pp. 430–439.

11. Ulavlivanie chastic iz dymovyh gazov pryamougol'nymi separatorami [Collection of particles from flue gases using rectangular separators] / A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva [et al.]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20., issue 15, pp. 78–80.

12. Kasimova B. R., Baubek A. A. and Kusataeva A. K. Razrabotka matematicheskoy modeli elektrofil'tra s vrashchayushchimsya osaditel'nym elektrodom [Development of a mathematical model of an electrostatic precipitator with a rotating precipitating electrode]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2013, vol. 322, issue 2, pp. 147–150.

13. Samoilova E. E., Lysikova T. D. Sovershenstvovanie tekhnologii ochistki gazovyh monoproizvodstv asfal'tobetonnyh smesey [Improving the technology for cleaning gas emissions from the production of asphalt concrete mixtures]. *Vestnik DonNASA*, 2023, vol. 163, issue 5, pp. 98–102.

14. Tugov A. N. Sovremennye tekhnologii termicheskoy pererabotki tverdyh kommunal'nyh othodov i perspektivy ih realizacii v Rossii (obzor) [Modern technologies for thermal processing of municipal solid waste and prospects for their implementation in Russia (review)]. *Teploenergetika*, 2021, issue 1, pp. 3–20.

15. Shejh A. A. Analiz vliyaniya processa pererabotki othodov stroitel'stva na velichinu zagryazneniya atmosfernogo vozduha [Analysis of the

construction waste recycling impact on the amount of air pollution]. *Vestnik DonNASA*, 2022, vol. 157, issue 5, pp. 56–61.

16. Iskhakova R. Ya., Nurgaliev A. I. Obezvozhivanie i ekologicheski bezopasnaya termicheskaya pererabotka izbytochnogo aktivnogo ila [Dewatering and environmentally friendly thermal processing of excess activated sludge]. *Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnih system*, 2024, vol. 2, issue 8, pp. 26–36.

17. Nikolaeva L. A., Iskhakova R. Ya. Adsorbcionnaya ochestka gazovyh vybrosov othodom proizvodstva ot oksidov azota [Gas emissions adsorption purification from industrial waste from nitrogen oxides]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*, 2023, vol. 93, issue 1, pp. 99–106.

18. Sugak E. V., Voynov N. A., Nikolaev N. A. Ochestka gazovyh vybrosov v apparatah s intensivnymi gidrodinamicheskimi rezhimami [Cleaning of gas emissions in devices with intensive hydrodynamic modes]. Kazan: Otechestvo, 2009, 224 p.

19. Laptev A. G., Basharov M. M., Lapteva E. A. *Matematicheskie modeli i metody*

raschetov teplomassoobmennyyh i separacionnyh processov v dvuhfaznyh sredah [Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media]. Stary Oskol: TNT, 2025. 288 p.

20. Mednikov E. P. *Turbulentnyj perenos i osazhdenie aerorozlej* [Turbulent transfer and sedimentation of aerosols]. Moscow: Nauka, 1980, 378 p.

21. Laptev A. G. *Gidromekhanicheskie processy v apparatah himicheskoy tekhnologii* [Hydromechanical processes in chemical engineering equipment]. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo «Lan'», 2024, 592 p.

22. Laptev A. G., Lapteva, E. A. Matematicheskaya model' teplomassoobmena i separacii aerorozlej v osevyh i zakruchennyh dispersno-kol'cevyh potokah gaza i zhidkosti [A mathematical model of heat and mass transfer and separation of aerosols in axial and swirling dispersed-annular flows of gas and liquid]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 2025, vol. 98, issue 4, pp. 1105–1114.

Исхакова Регина Яновна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,

Российская Федерация, Казань

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда»,

E-mail: imreginaiskh@gmail.com

Iskhakova Regina Yanovna

Federal state budgetary educational institution of higher education

«Kazan state power engineering university»,

Russian Federation, Kazan

candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of «Engineering ecology and labor safety»,

E-mail: imreginaiskh@gmail.com

Лаптев Анатолий Григорьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Казанский государственный энергетический университет»,

Российская Федерация, Казань

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда»,

E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Laptev Anatoly Grigorievich

Federal state budgetary educational institution of higher education «Kazan State Power Engineering University»,

Russian Federation, Kazan.

doctor of technical sciences, professor, professor of the department of «Engineering ecology and labor safety»

E-mail: tvt_kgeu@mail.ru