



ВОПРОСЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ УЗБЕКИСТАНА И МОНГОЛИИ

Умирова¹ Н.Р., Даваахуу¹ А., Морыганова¹ Ю.А., Никитина¹ И.С., Бураков¹ И.А.,
Ахметова И.Г.²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет г. Казань, Россия

nilufarumirova@mail.ru

Резюме: Актуальность исследования заключается в решении экологических вопросов, относящихся к сбросу сточной воды на тепловых электрических станциях (ТЭС) Узбекистана и Монголии, которые приводят к необходимости применения и совершенствования методов ее очистки. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблемы очистки сточных вод на ТЭС. Провести исследование современных технологий по очистке сточных вод для применения их на ТЭС Узбекистана и Монголии. Рассмотреть наиболее простые, экономичные и бессточные технологии по обработке сточных вод на энергетических объектах. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи принялся метод расчета объема сточных вод реализованный средствами SMath®. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрены проблемы очистки сточных вод на ТЭС. Произведен расчет объема производственных сточных вод, которые после предварительной очистки могут использоваться для технологических нужд ТЭС. В данной работе приведены данные по проведенным испытаниям сорбционных материалов нового поколения алюмосиликатного сорбента EcoFerox, активированного угля марки АК47 и АПТ-1 при концентрации НП $C_{НП} \approx 20$ мг/дм³ на основе дизельного топлива, трансформаторного и турбинного масел. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработана новая схема очистки и повторного использования сточных вод для действующих и проектируемых ТЭС Узбекистана и Монголии. Предложенное решение позволит частично решить проблемы водопотребления на энергетических объектах в условиях острой нехватки водных ресурсов. Полученные результаты показали, что сорбенты могут использоваться для доочистки сточных вод от НП до требуемых норм ПДК. Установлено, что наивысшая степень очистки сточных вод от НП достигается при использовании фильтров с двухслойной загрузкой.

Ключевые слова: производственная сточная вода; нефтепродукты; сорбент; фильтрующий материал; повторное использование очищенных сточных вод; предельно допустимые концентрации (ПДК); золошлаковые отходы.

Для цитирования: Умирова Н.Р., Даваахуу А., Морыганова Ю.А., Никитина И.С., Бураков И.А., Ахметова И.Г. Вопросы очистки сточных вод тепловых электрических станций Узбекистана и Монголии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 164-176. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-164-176.

ISSUES OF WASTEWATER TREATMENT FROM THERMAL POWER PLANTS IN UZBEKISTAN AND MONGOLIA

Umirova N.R., Davaahuu A., Moryganova J.A., Nikitina I.S., Burakov I.A., Akhmetova I.G.

National Research University "MPEI", Moscow, Russia
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nilufarumirova@mail.ru

Abstract: RELEVANCE of the study lies in solving environmental issues related to the discharge of wastewater at thermal power plants (TPPs) in Uzbekistan and Mongolia, which lead to the need to apply and improve methods for its purification. **THE PURPOSE.** To consider the problems of wastewater treatment at thermal power plants. To conduct a study of modern technologies for wastewater treatment for their application at thermal power plants in Uzbekistan and Mongolia.

To consider the simplest, most economical and dischargeless technologies for wastewater treatment at energy facilities. METHODS. In solving the problem, the method of calculating the volume of wastewater implemented by means of SMATH® was adopted. RESULTS. The article describes the relevance of the topic, considers the problems of wastewater treatment at thermal power plants. The volume of industrial wastewater, which after preliminary treatment can be used for the technological needs of thermal power plants, is calculated. This paper presents data on the tests of new generation sorption materials: aluminosilicate sorbent EcoFerox, activated carbon grade AK47 and APT-1 at a concentration of petroleum products CPP $\approx 20 \text{ mg/dm}^3$ based on diesel fuel, transformer and turbine oils. CONCLUSION. A new scheme for cleaning and reusing wastewater for existing and planned thermal power plants in Uzbekistan and Mongolia has been developed. The proposed solution will partially solve the problems of water consumption at energy facilities in conditions of acute shortage of water resources. The obtained results showed that sorbents can be used for additional purification of wastewater from NP to the required MAC standards. It was established that the highest degree of purification of wastewater from NP is achieved when using filters with a two-layer load.

Keywords: industrial wastewater; petroleum products; sorbent; filter material; reuse of treated wastewater; maximum permissible concentrations (MPC); ash and slag waste.

For citation: Umirova N.R., Davaahuu A., Moryganova Yu.A., Nikitina I.S., Burakov I.A., Akhmetova I.G. Issues of wastewater treatment from thermal power plants in Uzbekistan and Mongolia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 164-176. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-164-176.

Введение (Introduction)

Узбекистан обеспечивает свои потребности за счет собственных энергоресурсов. Располагаемая генерирующая мощность страны составляет 12,9 ГВт, из них на долю ТЭС (11 ГВт) приходится около 85% вырабатываемой мощности. Эксплуатация ТЭС связана с использованием большого количества воды. Более 90% воды расходуется в системах охлаждения различных аппаратов: конденсаторов турбин, масло-воздухоохладителей, движущихся механизмов и др.

Водная проблема региона в настоящее время заключается в том, что ресурсы поверхностных вод практически полностью исчерпаны, а использование подземных вод требует дополнительной очистки.

Производство тепловой и электрической энергии на тепловых электрических станциях (ТЭС) сопровождается значительным потреблением водных ресурсов. Республика Узбекистан и Монголия столкнулись с острым дефицитом водных ресурсов, что может негативно отразиться на ключевом секторе экономики, таком как энергетика [1].

В 2021 году Правительством Республики Узбекистан был принят Закон «О воде и водопользовании» (№ ЗРУ-733). Этот закон направлен на сокращение забора воды из рек и прекращение сброса сточных вод путем совершенствования производственных технологий, а также внедрения систем оборотного и повторного водоснабжения.

Для решения проблем водопользования на энергообъектах Узбекистана необходимо проведение количественной оценки сточных вод (СВ) и их вклада в общий водный баланс ТЭС, внедрение современных технологий и схем очистки сточных вод, а также исследования сорбционных материалов нового поколения.

Требования к качеству сбрасываемых вод энергетических объектов в поверхностные водоемы с каждым годом повышаются. Ужесточение требований задает положительную динамику к развитию новых схем очистки сточной воды и использованию очищенных стоков для нужд ТЭС, уменьшению сброса воды в окружающую среду без увеличения водозабора [2].

Цель работы заключается в исследовании современных технологий по очистке СВ для применения их на ТЭС Узбекистана и Монголии. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать схемные решения для интеграции новых технологий в схему очистки СВ на ТЭС Узбекистана и Монголии; выполнить экспериментальные исследования процессов сорбции нефтепродуктов (НП) с использованием сорбентов нового поколения при концентрации НП $C_{НП} \approx 20 \text{ мг/дм}^3$ для применения полученных результатов в разработанных технологических схемах очистки СВ;

Научная значимость исследования состоит в разработке нового подхода для очистки СВ на ТЭС в условиях острого дефицита природной воды; разработке методов и

алгоритмов расчета объема СВ на ТЭС, расположенных в различных географических регионах и климатических условиях с разным количеством выпадающих осадков; разработке схем очистки СВ для их повторного использования в технологическом цикле энергообъектов Узбекистана и Монголии, позволяющие значительно сократить дефицит воды.

Практическая значимость исследования заключается в разработке алгоритма расчета объема СВ на ТЭС. Впервые проведены испытания сорбционных материалов нового поколения алюмосиликатного сорбента EсоFerox, активированного угля марки АК47 и АРТ-1 при концентрации НП $C_{НП} \approx 20$ мг/дм³ на основе дизельного топлива, трансформаторного и турбинного масел. Полученные результаты показали, что сорбенты могут использоваться для доочистки сточных вод от НП до требуемых норм ПДК. Установлено, что наивысшая степень очистки сточных вод от НП достигается при использовании фильтров с двухслойной загрузкой.

Для того чтобы сточные воды не разрушали экосистему, установлены нормы качества сбрасываемой с промышленного объекта воды – нормативные допустимые сбросы загрязняющих веществ. Они рассчитываются так, чтобы состав загрязненных вод, сбрасываемых в природные водоемы, не превышал предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в водоеме. Таким образом, к качеству сточных вод перед их сбросом предъявляются достаточно жесткие требования, при этом лимитирующими показателями загрязнений являются нефтепродукты и взвешенные вещества.

Одним из способов улучшения экологической ситуации является повторное использование очищенных сточных вод для нужд ТЭС, например, в системе оборотного охлаждения (СОО), на водоподготовительной установке (ВПУ) или на других промышленных предприятиях.

Вопросы очистки сточных вод ТЭС, а также сокращения и утилизации стоков в России активно изучались и продолжают исследоваться рядом ученых. Среди них можно выделить таких специалистов, как Покровский В.Н., Ларин Б.М., Иванов Е.Н., Седлов А.С., Шищенко В.В., Юрчевский Е.Б., Солодьянников В.В., Федосеев Б.С., Фейзиев Г.К. и другие. Важным вкладом в развитие данной области стало введение Седловым А.С. и Шищенко В.В. понятия «экологически безопасные ТЭС», что подчеркивает необходимость внедрения экологически ориентированных подходов в энергетике.

Концепция «нулевого сброса», появившаяся в XX веке, включает технологии выпаривания и кристаллизации сточных вод с последующим получением твердых осадков, их складированием и/или захоронением.

В настоящее время исследования в этой области продолжают, причем акцент делается на поиск новых решений в области малосточных, ресурсосберегающих технологий. Проводятся масштабные работы по совершенствованию систем водопользования на ТЭС, направленные на сокращение объемов сточных вод и снижение их минерализации. Примером таких исследований могут служить работы ученых Чичеровой Н.Д., Чичерова А.А., Николаевой Л.А., Филимоновой А.А.

Экологическими аспектами энергетики и промышленности занимаются Еремина Н.А., Ксенофонтов Б.С., Карманов А.П.

Особый интерес представляют исследования Громова С.Л., Долгова Е.К., Рябчикова Б.Е., Пантелеева А.А., Первова А.Г., посвященные вопросам уменьшения сбросов сточных вод с водоподготовительных установок, оснащенных современными мембранными технологиями.

Таким образом, проблема очистки сточных вод ТЭС и сокращения их объема является актуальной и продолжает разрабатываться как в России, так и за рубежом, с учетом современных экологических требований и технологических возможностей, что подчеркивает важность дальнейших исследований и внедрения инновационных решений.

Материалы и методы (Materials and methods)

Мубарекская ТЭЦ (МТЭЦ) производит электроэнергию и отпускает технологический пар на Мубарекский газоперерабатывающий завод (МГПЗ). Проектная мощность станции составляет 60 МВт, в настоящий момент 25 МВт. В состав основного оборудования входят 3 паровых котла марки ТГМЕ-464, паропроизводительностью 500 т/час. Основное топливо – природный газ.

Пар после использования в турбине направляется на МГПЗ и возвращается в виде конденсата, который очищается на конденсатоочистке. Производительность конденсатоочистки от 220-250 м³/час.

Вода сырая (техническая) поступает на натрий катионирование и дальше умягченная вода идет на испарительные установки. Производительность установки 145 м³/час.

Для подпитки СОО необходимо 70 м³/час воды.

Требуемый расчетный объем технической воды на производственные нужды (подпитку котлов, СОО), а также поверхностные стоки с территории МТЭЦ приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Водопотребление и водоотведение на МТЭЦ
Water consumption and sanitation at MTPP

№	Наименование	Водопотребление		Водоотведение	
		Ез.изм.	Кол-во	Ез.изм.	Кол-во
1	Производственные	тыс. м ³ /год	1884	тыс. м ³ /год	193
2	Хозяйственно питьевые	тыс. м ³ /год	6	тыс. м ³ /год	6
3	Полив территории и зеленых насаждений	тыс. м ³ /год	6	тыс. м ³ /год	2
	Всего:	тыс. м ³ /год	1896	тыс. м ³ /год	201

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

По расчетным данным общее количество необходимой для технологического процесса воды на МТЭЦ составляет 1896 тыс. м³/год, а общее количество образующихся стоков по расчету составляет 201 тыс. м³/год.

Из-за засушливого года и острого дефицита воды фактически в 2020 году на МТЭЦ поступила техническая вода в количестве 876 тыс. м³/год, а в 2021 году 1375,0 тыс. м³/год.

В ближайшее время реконструкция МТЭЦ не предусматривается.

Все стоки МТЭЦ поступают на пруд-испаритель МГПЗ.

В таблице 2 приведены данные по составу сточных вод МТЭЦ, отводимых на пруд-испаритель, в котором происходит испарение воды и просачивание в почву.

Таблица 2
Table 2

Состав сточных вод МТЭЦ, поступающих на пруд-испаритель
The composition of MTPP wastewater entering the evaporator pond

Показание состава сточных вод	Допустимая концентрация	Фактическая концентрация
ХПК, мг/дм ³	15,0	7,33
pH	6,5-8,5	7,8
Сухой остаток, мг/дм ³	1000,0	459,16
Взвешенные вещества, мг/дм ³	15,0	7,34
Сульфаты, мг/дм ³	100,0	42,25
Хлориды, мг/дм ³	300,0	151,83
Растворенный кислород, мг/дм ³	4-6	4,44
БПК ₅ , мг/дм ³	3,0	0,175
Азот аммония, мг/дм ³	0,5	0,44
Азот нитритов, мг/дм ³	0,08	0,006
Азот нитратов, мг/дм ³	45,0	6,719
Фосфаты, мг/дм ³	0,3	0,13
Железо, мг/дм ³	0,05	0,045
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,05	0,028
Жесткость мг-экв/дм ³	7,0	7,875
Кальций, мг/дм ³	180,0	51,316
Магний, мг/дм ³	40,0	25,833
СПАВ, мг/дм ³	0,5	0,075

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Согласно Постановления Кабинета Министров Республики Узбекистан от 07.09.2020 года за № 541 «Об утверждении Положения о государственной экологической экспертизе в Республике Узбекистан» данное предприятие относится к III категории экологической опасности.

Исходя из данных представленных в таблице 1, ежегодно на пруд-испаритель МГПЗ поступает более 200 тыс. м³/год сточных вод МТЭЦ, то есть около 10% воды безвозвратно теряется при испарении. А эту воду после определенной степени очистки можно снова пускать в технологические процессы.

Предложена принципиальная технологическая схема повторного использования сточных вод производственного цикла (рис. 1).

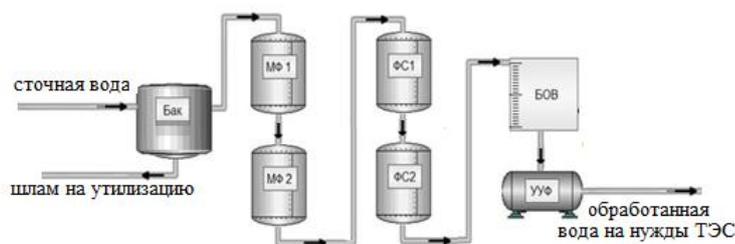


Рис. 1. Схема очистки сточных вод для Мубарекской ТЭЦ: 1 – бак аккумулирующий; 2 – механические фильтры I и II ступени (МФ1, МФ2); 3 – сорбционные фильтры I и II ступени (ФС1, ФС2); 4 – бак очищенной воды (БОВ); 5 – блок обеззараживания на УФ-лучах (УУФ); 6 – обработанная вода на повторное использование

Fig. 1. Wastewater treatment scheme for the Mubarek TPP: 1 – storage tank; 2 – mechanical filters of the first and second stages (MF1, MF2); 3 – sorption filters of the first and second stages (FS1, FS2); 4 – tank of purified water; 5 – unit of disinfection on UV rays (UVF); 6 – treated water for reuse Usage

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Механический фильтр МФ1 оборудован сетчатым фильтром для очистки сточных вод от грубодисперсных примесей (ГДП), МФ2 загруженный гидроантрацитом предназначен для очистки сточных вод от мелкодисперсных примесей (МДП). Сорбционные фильтры предусмотрены для удаления нефтепродуктов (НП). ФС1 загружен сорбционным материалом ЕсоFегох, на поверхности которого образуется пленка из НП и хорошо задерживается на ней, а ФС2 загружен сорбентом АК47, который по своей природе имеет свойство впитывать в себя НП. При применении в этой схеме второго сорбционного фильтра (ФС2) остаточное содержание нефтепродуктов в очищенной воде не превысит 0,05 мг/л.

Проведены эксперименты по сорбции нефтепродуктов и предлагается использование двухслойной загрузки сорбционных материалов в фильтр ФС2. Это позволит достичь более высокого качества очистки воды от примесей по сравнению с однослойной загрузкой.

На кафедре ТОТ были проведены исследования сорбентов типа БАУ, АК47, АПТ-1, АПТ-2, АПТ-4, АПТ-8, ЕсоFегох и других минеральных и природных сорбентов [3]. Использование комбинированных загрузок сорбционных материалов позволяет добиться наилучших результатов и высокого качества очистки воды от примесей.

После сорбционных фильтров вода поступает в бак очищенной воды, из которого насосами подаётся на установку ультрафиолетового обеззараживания (УУФ). Метод УФ-обеззараживания позволяет удалить микробиологическое загрязнение и отказаться от использования реагентной обработки стоков. Обработанная вода может быть направлена на технологические нужды СОО или на подпитку ВПУ.

При повторном использовании производственных сточных вод водопотребление уменьшится на Мубарекской ТЭЦ 8-11%.

Наиболее популярными исходными материалами для создания волокнистых нефтяных сорбентов являются полипропилен, полимер, вата, войлок, ткани, синтепон, базальтовое волокно. Особенность волокнистых материалов заключается в глубоком поглощении нефти, так как волокна способны раздвигаться, тем самым создавая структуру сорбент–нефтепродукт, которая постепенно сжимается под действием силы тяжести, и укрупненные частицы нефтепродуктов (до 20-25 %) сливаются вниз.

Волокнистые сорбенты могут быть использованы на ТЭС для оперативной ликвидации небольших утечек (разливов) нефтепродуктов (мазута, масла).

Основной задачей данной работы был анализ современных материалов с целью применения их для очистки замасленных и замазученных вод ТЭС [4-6]. На современном рынке предложены материалы нового поколения, работающие по принципу коалесценции.

К сорбентам нового поколения относится сорбент АПТ-8, который представляет собой нетканый, волокнистый материал, выполненный в виде полотна, сформированного в единую, объемную структуру из скрепленных между собой гидрофобных алюмосиликатных и полимерных волокон. При таком способе формирования создаются дополнительные емкие полости, в которые нефтепродукты свободно проникают при непосредственном контакте, заполняя весь объем полотна за счет капиллярных сил, и прочно держатся внутри волокнистой структуры сорбента за счет адгезии.

Проведены испытания сорбента АПТ-8.

На ТЭЦ сепаратор АПТ с сорбентом АПТ-8 может быть установлен в местах образования загрязненных сточных вод: мазутохозяйство, маслохозяйство. Очищенную с помощью сепаратора воду можно подавать сразу на механические и сорбционные фильтры с активированным углем.

Для горно-обогатительного комбината (ГОК) «Эрдэнэт» (Монголия) авторским коллективом разработаны предложения по усовершенствованию схемы водопользования, цель которых повторное использование сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» в структуре ГОК. В частности, прошедшая ступень очистки на АПТ-1 сточная вода с ТЭС ГОК поступает на ступень флотации ГОК, что позволяет повысить извлечение медного концентрата из исходного коллективного (медно-молибденового) концентрата. Предлагаемая усовершенствованная схема представлена на рисунке 2. Отличие предлагаемой схемы отныне действующей состоит в том, что поток сточных вод ГОК ТЭС «Эрдэнэт» подается в ИФО ГОК «Эрдэнэт», а не в Зумпф и затем в хвостохранилище.

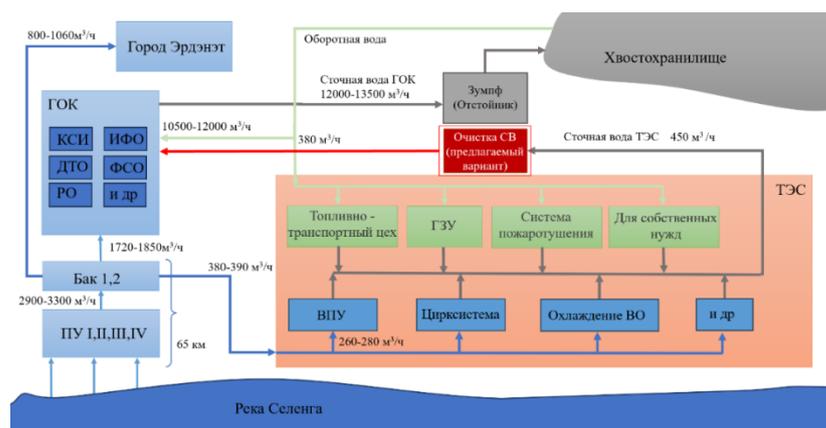


Рис. 2. Предлагаемая усовершенствованная схема сточных вод ТЭС и ГОК «Эрдэнэт»

Fig. 2. Proposed improved scheme of wastewater from the Erdenet Thermal Power Plant and the Erdenet Mining and Processing Plant

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На этапе очистки сточных вод (на рис. 2 обозначена «Очистка СВ») предполагается организовать фильтрационный барьер, который будет обеспечивать уменьшение концентраций химических примесей в сточных водах. На этапе очистки сточных вод предполагается использовать сорбент «нового поколения» АПТ-1.

Сорбент АПТ-1 представляет собой каталитический фильтрующий материал, используемый для очистки воды (в большей части для очистки от соединений железа и марганца). Как известно, эффективность процесса фильтрования зависит от многих свойств сорбционного материала, в том числе и от шероховатости поверхности. Для того, чтобы посмотреть, как выглядит поверхность сорбционного материала АПТ-1, были сделаны фотографии поверхности материалов на цифровом микроскопе КН-8700 с 2500-кратным увеличением представлен на рисунке 3(а) [4]. Представленное фото поверхности сорбента помогает лучше объяснить процессы сорбции. Внешний вид материала представлен на рисунке 3(б). На представленном фото поверхность фильтрующего материала видно, что сорбент АПТ-1 обладает развитой пористой структурой, поры крупные. На поверхность сорбента-АПТ-1 – поры размером от 7 до 50 мкм, глубиной до 60 мкм.

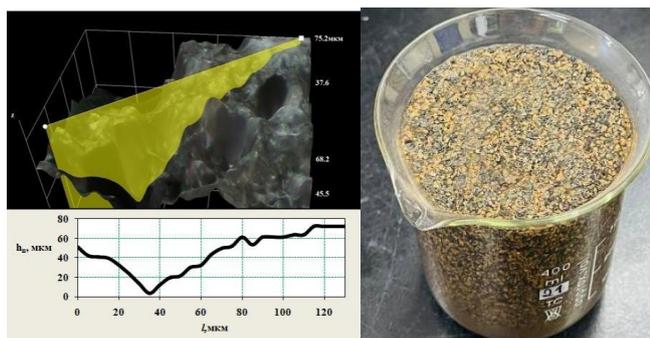


Рис. 3. Сорбент АПТ-1: (а) под микроскопом, (б) внешний вид

Fig. 3. Sorbent APT-1: (a) under a microscope, (b) external appearance

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В процессе проведения эксперимента испытуемый водный раствор (сточные воды ТЭС ГОК «Эрдэнэт») самотёком подавался через фильтровальную колонну, загруженную АПТ-1 (рис. 4). Очищенная вода, прошедшая сорбирующий слой, собиралась в ёмкость (лабораторная колба). В исходной и очищенной воде (после колонны) в водно-химической лаборатории ТЭС ГОК «Эрдэнэт» определялись химические показатели, представленные в таблице 3.

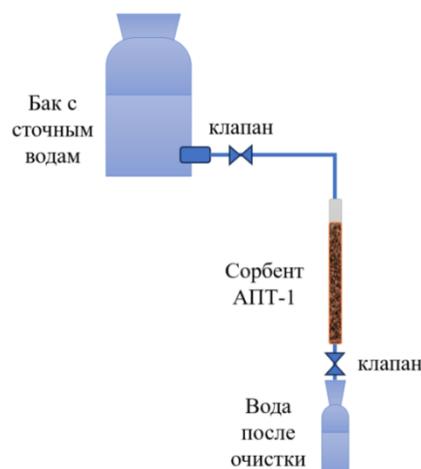


Рис. 4. Фото и схема испытательного стенда в водно-химической лаборатории ТЭС ГОК «Эрдэнэт»
 Fig. 4. Photo and diagram of the test bench in the water-chemical laboratory of the TPP GOK "Erdenet"

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Изменение показателей химического состава сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» при использовании АПТ-1

Changes in the indicators of the chemical composition of wastewater from GOK "Erdenet" thermal power plant using APT-1

№	Показатели качества водных растворов	Используемый стандарт для анализа	Испытуемый раствор (сточные воды ТЭС)	Раствор после пропуски через сорбент АПТ-1
1	Na ⁺ , мг/дм ³	MNS 4335:1996 MNS 4341:1996 MNS 1097:1970 MNS 4423:1997 MNS 10523:2001 MNS ISO 8288:1999 MNS ISO 99631:2001	135,3	124.9
2	K ⁺ , мг/дм ³		48,2	39.09
3	Mo ³⁺ , мг/дм ³		0,960	0.915
4	NH ₄ ⁺ , мг/дм ³		3,86	3.68
5	Cu ²⁺ , мг/дм ³		0,036	0.018
6	Ca ²⁺ , мг/дм ³		458,29	194.43
7	Mg ²⁺ , мг/дм ³		28.89	10.98
8	Zn ²⁺ , мг/дм ³		0.054	0.129
9	Fe ²⁺ , мг/дм ³		0.542	0.307
10	Cd ²⁺ , мг/дм ³		0.005	-
11	Pb ²⁺ , мг/дм ³		0.052	-
12	Cl ⁻ , мг/дм ³		19.35	16.68
13	SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³		1506.08	1328.81
14	NO ₃ ⁻ , мг/дм ³		9.55	11.3
15	NO ₂ ⁻ , мг/дм ³		0.14	0.125
16	HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³		59.02	45.90
17	CO ₃ ²⁻ , мг/дм ³		-	-
18	Cl ³⁺ , мг/дм ³		0.042	-
19	Ag ⁺ , мг/дм ³		0.003	-
20	Сухой остаток, мг/дм ³		2424	2310
21	H ₂ SiO ₃ , мг/дм ³		20.62	23.13
22	pH, ед.		6.372	7.426
23	Общая жесткость, мг-экв/дм ³		25.25	10.59

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Анализ результатов испытаний, представленных в таблице 3, даёт понимание о снижении следующих показателей: общая жесткость снизилась в 2,38 раза; концентрация Ca^{2+} снизилась в 2,35 раза; концентрация Mg^{2+} снизилась в 2,63 раза; концентрация меди снизилась в 2 раза; для всех остальных показателей наблюдается незначительное снижение.

Таким образом, применение фильтров, загруженных АПТ-1, позволяет получить обработанную воду более высоко качества. А корреляционное исследование с применением метода Decision Tree Regressor [5] позволяет делать прогнозирование количества извлекаемой меди из сточных вод. До очистки извлечение меди составляло 86,7%. По расчетам после применения сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» извлечение меди увеличилось до 87,1%, что соответствует росту на 0,4%.

Однако, применение схемы, представленной на рис. 2 имеет проблемной наличие общего сточного коллектора, куда, в том числе производится подача и промывочной воды после системы гидро-золоудаления (ГЗУ) ТЭС ГОК «Эрдэнэт». В промывочной воде во взвешенном состоянии присутствует значительное количество золошлаковых отходов (ЗШО) сжигания угля. В связи с этим, существует необходимость разделения потоков сточных вод ТЭС ГОК «Эрдэнэт» на общий поток сточных вод и на поток сточных вод с системы ГЗУ ТЭС.

Авторский коллектив, решая обозначенную выше проблему, поставил задачу разработки системы извлечения из сточных вод (пульпы) системы ГЗУ несгоревшего от недожѳга в котлах станции угля (по [8] на данную проблему активно обращают внимание промышленные и энергетические предприятия по всему миру). Для этого были рассмотрены способы разделения разноплотных твѳрдых веществ, представленные в работах [6].

Выделяя разновидности систем золоудаления наиболее широко применимыми являются системы гидрозолоудаления (ГЗУ) и пневмотранспорта золы и шлаков [7-8]. Подавляющее большинство энергетических объектов, согласно [9] имеет систему ГЗУ. На ТЭС ГОК «Эрдэнэт» функционирует система ГЗУ. В рамках исполнения основных принципов функционирования обновлѳнной системы ГЗУ предполагается включение в неё ступени позволяющей извлекать из пульпы ЗШО частицы несгоревшего угля.

Реализация методов разделения разноплотных веществ, представленных в [10] базируется на подачи исходного угля в рабочую зону сепаратора, заполненного тяжѳлой однородной (однофазной) высокоплотной средой (природными подземными хлоридными натриевыми рассолами, бишофитом, сточными высокоплотными водами Na-катионитных фильтров). Более лёгкие частицы (имеющие меньшую плотность) под действием гравитационных сил всплывают вверх, более тяжѳлые (более плотные) тонут. Всплывшие частицы представляют собой угольный концентрат (уголь с повышенной теплотой сгорания и пониженной зольностью), утонувшие – отходы обогащения (уголь с пониженной теплотой сгорания и повышенной зольностью). Иллюстрация описанному представлена на рисунке 5.

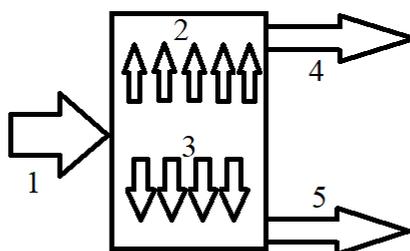


Рис. 5. Схема реализации гравитационных процессов обогащения с применением в качестве тяжѳлой среды высокоминерализованных водных растворов природного и техногенного происхождения: 1 – исходный уголь; 2 – лёгкий продукт; 3 – тяжѳлый продукт; 4 – концентрат угля; 5 – отходы обогащения

Fig. 5. Scheme of implementation of gravity enrichment processes using highly mineralized aqueous solutions of natural and man-made origin as a heavy medium: 1 – the source coal; 2 – the light product; 3 – the heavy product; 4 – the coal concentrate; 5 – the enrichment waste

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С целью проведения основной экспериментальной работы в рамках функционирования учебно-научной лаборатории анализа топлива и энергетических масел НИУ «МЭИ» были подготовлены образцы:

– ЗШО угля месторождения Шарын гол;

- ЗШО угля месторождения Багануур;
- ЗШО угля месторождения Налайх.

Помимо этого, с ТЭС ГОК «Эрдэнэт» была отобрана и привезена в НИУ «МЭИ» проба ЗШО, которую отобрали непосредственно из системы золоудаления, из воронки котла.

Обозначенные выше угли были выбраны в связи с территориальным расположением ГОК «Эрдэнэт» и ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (угли месторождения ШАрын гол являются основным энергетическим топливом на ТЭС ГОК «Эрдэнэт»; месторождения Багануур и Налайх находятся в непосредственной близости от ТЭС ГОК «Эрдэнэт»). В таблице 4 представлены энергетические характеристики выбранных углей.

Таблица 4

Table 4

Характеристики углей, рассматриваемых в работе месторождений Монголии
Characteristics of the coals considered in the work of deposits in Mongolia

Месторождение угля	Элементарный состав, %						
	C ^a	H ^a	S ^a	O ^a	N ^a	A ^a	W ^a
Шарын гол	44,6	3,2	0,7	7,9	0,9	34,8	9,0
Багануур	60,4	3,9	0,6	21,3	1,3	6,0	7,0
Налайх	55,6	4,9	0,3	21,1	0,3	11,5	6,3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Общий вид, подготовленных для исследований ЗШО, представлен на рисунке 6.



Рис. 6. Общий вид ЗШО, подготовленных для исследования
 Fig. 6. General view of the ash and slag waste prepared for the study

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В рамках проведения экспериментальной работы исходную пробу (масса исходной пробы 2 г) обогащаемой смеси ЗШО (все 4 вида: ЗШО Шарын гол; ЗШО Багануур, ЗШО Налайх; ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (Шарын гол)) помещали в лабораторный стакан с предварительно налитой туда тяжёлой средой. Плотность тяжёлой среды варьировалась от плотности чистой воды до высокоминерализованного раствора и составляла 1000 кг/м³; 1050 кг/м³; 1100 кг/м³; 1150 кг/м³; 1200 кг/м³. После гравитационного разделения всплывшие частицы угля и утонувшие ЗШО извлекались, промывались водой из системы водоснабжения НИУ «МЭИ» общим солесодержанием до 300 мг/дм³, затем высушивались естественным путём (на открытом воздухе при температуре окружающей среды 23-24 °С). После высушивания определялась масса извлечённых частиц угля и отходов обогащения. Взвешивание проводилось на лабораторных весах Charites YUC 500gx0.01g.

Согласно схеме экспериментальной работы, представленной на рисунке 5, реализовывались исследования возможности извлечения несгоревшего угля из смеси ЗШО.

Визуализация выделения из подготовленных образцов ЗШО несгоревших частиц угля с применением метода гравитационного обогащения, разработанного на кафедрах ТОТ и ТЭС НИУ «МЭИ», представлена на рисунке 7.

В таблице 5 представлены результаты извлечения несгоревшего угля из исходных золошлаковых смесей.

По полученным результатам были построены зависимости массовой доли угля, извлечённого из смесей ЗШО, от плотности тяжёлой среды. Зависимость представлена на рисунке 8.



Рис. 7. Визуализация обогащения ЗШО угля и месторождений Монголии Fig. 7. Visualization of the enrichment of ash and slag waste from coal deposits in Mongolia

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 5

Table 5

Извлечение несгоревшего угля из ЗШО. Результаты экспериментальной работы
Extraction of unburned coal from ash and slag waste. The results of the experimental work

Исходная смесь ЗШО	Процент извлечённых несгоревших угольных частиц, %				
Плотность тяжёлой среды, кг/дм ³	1000,00	1050,00	1100,00	1150,00	1200,00
ЗШО Шарын гол	0,00	0,50	4,50	11,00	13,00
ЗШО Багануур	0,50	2,00	2,00	2,50	7,00
ЗШО Налайх	0,00	0,00	5,00	6,00	6,50
ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (Шарын гол)	0,00	0,00	2,00	5,00	6,00

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

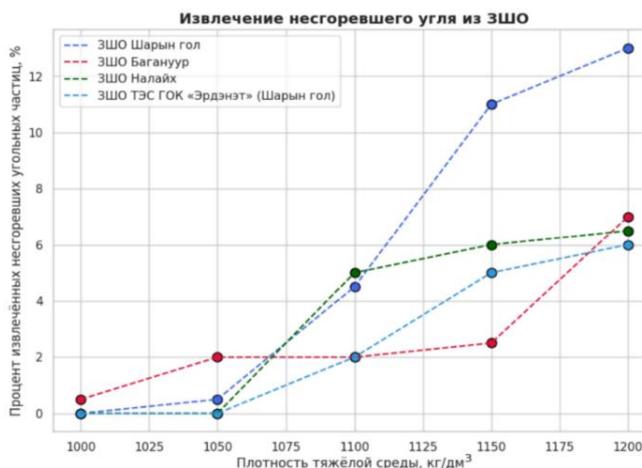


Рис. 8. Визуализация зависимости массовой доли угля, извлечённого из смесей ЗШО, от плотности тяжёлой среды Fig. 8. Visualization of the dependence of the mass fraction of coal extracted from ash and slag waste mixtures on the density of a heavy medium

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Полученные результаты дают понимание возможности реализации представленной технологии извлечения несгоревших угольных частиц в системе ГЗУ ТЭС ГОК «Эрдэнэт». Однако реализация представленной технологии требует схемных решений для системы функционирования ТЭС ГОК «Эрдэнэт», которые будут подробно разобраны и описаны в четвертой главе текущего труда.

Для извлечённого же из смеси ЗШО угля необходимо понимание его качества, так как в зависимости от качества существует разнообразие путей применения данного угля после извлечения из ЗШО. В связи с обозначенной необходимостью уголь, извлечённый из ЗШО, представленным выше способом, подвергался исследованию для определения его характеристик (F_c , W^a , A^a , V^{daf}) по методикам, представленным в ГОСТ Р 55661-2013, ГОСТ 11014-2001 и ГОСТ Р 55660-2013.

Последовательность действий заключалась в экспериментальном определении W^a , A^a , V^{daf} в пробах несгоревшего угля, извлечённых с применением тяжёлой среды плотностью 1100 кг/м³ (плотность определена в соответствии с минерализацией подземных

рассолов, имеющихся в наличии на территории Республики Монголия) и дальнейшем расчёте теплоты сгорания рассматриваемых углей по заранее подобранных формулам (1 – 3) корреляции Бойе/Кирова, группы исследователей под руководством Демирбаш и группы исследователей под руководством Парих из [12-16]. Формулы представлены ниже:

– формула Демирбаш (1) [12, 13]:

$$Q_s^a = 0,196 * FC + 14,119 \quad (1)$$

– формула Парих (2) [14, 15]:

$$Q_s^a = 0,3536 * FC + 0,1559 * V^a - 0,0078 * A^a \quad (2)$$

– формула из корреляции Бойе/Кирова (3) [16]:

$$Q_s^a = 35,4 * FC + 3,568 \quad (3)$$

Результаты экспериментальной и последующей расчётной работы представлены в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Характеристики углей, извлечённых из ЗШО
Characteristics of coals extracted from ash and slag waste

Исходная смесь ЗШО (уголь месторождения)	Характеристики углей			
	A ^a , %	W ^a , %	V ^{daf} , %	Q _s ^a , МДж/кг
ЗШО Шарын гол	42,0	11,0	34,5	13,02
ЗШО Багануур	28,5	8,0	42,0	16,61
ЗШО Налайих	12,5	8,0	42,0	22,04
ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» (Шарын гол)	25,0	10,5	33,0	18,32

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Представленные в таблице 6 результаты прошли сравнение с данными, представленными в таблице 4.

Увеличение зольности на аналитическую массу в пробах извлечённого угля для ЗШО месторождений Шарын гол и Налайих, а также значительное увеличение зольности для ЗШО Багануур говорит о том, что вместе с извлечённым углём всплывает и часть ЗШО, а это означает, что в качестве тяжёлой среды следует использовать менее плотные высокоминерализованные растворы. Уменьшение же зольности на аналитическую массу в извлечённом угле из смеси ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» указывает на то, что для реальных ЗШО тяжёлая среда плотностью 1100 кг/м³ подобрана верно, так как уменьшение зольности извлечённого угля указывает на то, что в концентрат попадают только лёгкие фракции. Остальные показатели W^a, V^{daf} меняются не значительно и решающего влияния на качество угля не оказывают.

Извлечённый уголь можно обратно направлять в систему топливоподачи на котлы ТЭС ГОК «Эрдэнэт», либо использовать в качестве исходного сырья для процессов брикетирования.

Выводы (Conclusions)

Для решения вопросов острой нехватки воды для Мубарекской ТЭЦ Узбекистана предлагается очистка и повторное использование сточных вод производственного цикла.

Для Мубарекской ТЭЦ предложенная схема включает очистку сточных вод, содержащих небольшие концентрации нефтепродуктов (20-50мг/л). В схему включены сорбционные фильтры, загруженные новыми сорбентами нового поколения комплексного типа, позволяющими удалять нефтепродукты. Сорбенты прошли испытания на кафедре ТОТ НИУ «МЭИ».

Для ТЭС ГОК «Эрдэнэт» и ГОК «Эрдэнэт» Монголии предложена усовершенствованная схема очистки сточных вод. Применение предложенной схемы позволяет увеличить показатель извлечения медного концентрата. Величина роста извлечения составляет 0,4%.

Очистка сточных вод по разработанным и усовершенствованным схемам позволит повторно использовать сточные воды в цикле энергетических и промышленных объектов Узбекистана и Монголии.

Предлагаемая схема извлечения несгоревшего угля из пульпы ЗШО ТЭС ГОК «Эрдэнэт» позволяет извлекать до 13% несгоревших угольных частиц в зависимости от плотности тяжёлой среды и от исходного смеси ЗШО.

Литература

1. Умирова Н.Р., Никитина И.С. Новые решения по очистке сточных вод ТЭС Узбекистана от микробиологических загрязнений / Н.Р. Умирова // Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Сборник докладов: XI международной научно-технической конференции. М.: ВТИ, 2024. С.9.
2. Умирова Н.Р., Котенко, А.Ю., Зорин А.О., Анисимов А.Ю. Очистка ливневых стоков ТЭС Узбекистана / Н.Р. Умирова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов: материалы XXIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва: – С. 715
3. Ко Ко М. Экспериментальное исследование сорбционных технологий для очистки сточных вод от нефтепродуктов на тепловых электростанциях Мьянмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИУ «МЭИ». 2018 –134 с.
4. Даваахуу А. Проблемы повторного использования и утилизации сточных вод горно-обогатительного комбината и ТЭС "Эрденет" / А. Даваахуу, И.А. Бураков // Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи: сб. докл. / под общ. ред. Р.В. Акулич // XI Международная научно-техническая конференция. – М.: АО «ВТИ», 2024. – 62 с, С. 51–55.
5. Путилова И.В. Обзор оборудования и схем систем золошлакоудаления ТЭС / И.В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2023. № 1 (406). С. 63-76.
6. Путилова И.В. Рекомендации по снижению абразивного износа гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС / И.В. Путилова // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 31-33 (353-355). С. 81-92.
7. Егоркина М.А. Системы золоудаления на теплоэлектростанциях / М.А. Егоркина, М.В. Васина, Р.Ю. Васин // Актуальные вопросы энергетики. 2020. Т. 2. № 1. С. 105-110.
8. Аунг Х.Н. Разработка методов повышения эффективности получения экологически чистого топлива на основе переработки твёрдого топлива для условий Мьянмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИУ «МЭИ». 2023 –111 с.
9. Ёе В. А. Исследование эффективности применения процессов энерготехнологической переработки твёрдого топлива для его дальнейшего использования на тепловых электрических станциях в условиях Мьянмы / Ёе В.А. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. НИУ «МЭИ». 2023 – 125 с.
10. Аунг К.М. Разработка технологии использования высокоминерализованных сточных вод энергетических объектов в процессе обогащения углей для условий Мьянмы // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: НИУ «МЭИ». 2024 – 131 с.
11. A. Demirbaş. Fuel 76(5), 431 (1997).
12. D. Kavšek. Characterization of Slovenian coal and estimation of coal heating value based on proximate analysis using regression and artificial neural networks / D. Kavšek, A. Bednárová, M. Biro, R. Kranvogel, D. Brodnjak Vončina, E. Beinrohr // Cent. Eur. J. Chem.11(9).2013. p. 1481-1491.
13. T. Cordero, F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol, J.J. Rodriguez, Fuel 80, 1567 (2001).
14. J. Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal, Fuel 84, 487 (2005).
15. C. Qian. Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis / C. Qian, Q. Li, Z. Zhang, X. Wang, J. Hu, W. Cao // Fuel 265 (2020) 116925.

Авторы публикации

Умирова Нилуфар Равильевна – аспирант кафедры ТОТ, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. nilufarumirova@mail.ru, UmirovaNR@mpei.ru

Даваахуу Амармурун – аспирант кафедры ТОТ, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. DavaakhuuA@mpei.ru

Морыганова Юлия Августовна – канд. хим. наук, доцент кафедры ТОТ, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. MoryganovaYA@mpei.ru

Никитина Ирина Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры ТОТ, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. nikitinai@mpei.ru

Бураков Иван Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры ТОТ, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия. BurakovIA@mpei.ru

Ахметова Ирина Гареевна – докт. техн. наук, доцент, проректор по развитию и инновациям Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-2005>. irina_akhmetova@mail.ru.

References

1. Umirova N.R., Nikitina I.S. New solutions for wastewater treatment of thermal power plants of Uzbekistan from microbiological contamination / N.R. Umirova // Water treatment and water-chemical

regimes of thermal power plants. Collection of reports: XI International Scientific and Technical Conference. Moscow: VTI, 2024. pp. 11-21.

2. Umirova N.R., Kotenko, A.Yu., Zorin A.O., Anisimov A.Yu. Cleaning of storm drains of thermal power plants of Uzbekistan / N.R. Umirova // Radio electronics, electrical engineering and power engineering. Abstracts: proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference of students and postgraduates. Moscow: – p. 715.

3. Ko Ko M. Experimental study of sorption technologies for wastewater treatment from petroleum products at thermal power plants in Myanmar // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NRU "MPEI". 2018 -134 p.

4. Davaahuu A. Problems of reuse and disposal of wastewater from the mining and processing plant and the Erdenet thermal power plant / A. Davaahuu, I.A. Burakov // Water treatment and water-chemical regimes of thermal power plants. Goals and objectives: collection of documents / under the general editorship of R.V. Akulich // XI International Scientific and Technical Conference. Moscow: JSC "VTI", 2024. – 62 p., pp. 51-55.

5. Putilova I.V. Overview of equipment and schemes of TPP ash and slag removal systems / I.V. Putilova // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology. 2023. No. 1 (406). pp. 63-76.

6. Putilova I.V. Recommendations for reducing abrasive wear of hydrotransport pipelines of thermal power plant ash and slag removal systems / I.V. Putilova // International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology. 2020. No. 31-33 (353-355). pp. 81-92.

7. Yegorkina M.A. Ash removal systems at thermal power plants / M.A. Yegorkina, M.V. Vasina, R.Yu. Vasin // Actual issues of energy. 2020. Vol. 2. No. 1. pp. 105-110.

8. Aung H.N. Development of methods to increase the efficiency of obtaining environmentally friendly fuels based on solid fuel processing for Myanmar conditions // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NRU "MPEI". 2023 - 111 p.

9. Ye V.A. Investigation of the effectiveness of the use of energy-technological processing of solid fuels for its further use at thermal power plants in Myanmar / Ye V.A. // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow. NRU "MEI". 2023 – 125 p.

10. Aung K.M. Development of technology for the use of highly mineralized wastewater from energy facilities in the process of coal enrichment for the conditions of Myanmar // Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NRU "MPEI". 2024 – 131 p.

11. A. Demirbaş. Fuel 76(5), 431 (1997).

12. D. Kavšek. Characterization of Slovenian coal and estimation of coal heating value based on proximate analysis using regression and artificial neural networks / D. Kavšek, A. Bednárová, M. Biro, R. Kranvogel, D. Brodnjak Vončina, E. Beinrohr // Cent. Eur. J. Chem. 11(9).2013. p. 1481-1491.

13. T. Cordero, F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol, J.J. Rodriguez, Fuel 80, 1567 (2001).

14. J. Parikh, S.A. Channiwala, G.K. Ghosal, Fuel 84, 487 (2005).

15. C. Qian. Prediction of higher heating values of biochar from proximate and ultimate analysis / C. Qian, Q. Li, Z. Zhang, X. Wang, J. Hu, W. Cao // Fuel 265 (2020) 116925.

Authors of the publication

Nilufar R. Umirova – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. nilufarumirova@mail.ru, UmirovaNR@mpei.ru

Davaahuu Amarmurun – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. DavaakhuuA@mpei.ru

Julia A. Moryganova – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. MoryganovaYA@mpei.ru

Irina S. Nikitina – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. nikitinai@mpei.ru

Ivan A. Burakov – National Research University "MPEI", Moscow, Russia. BurakovIA@mpei.ru

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. irina_akhmetova@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **07.02.2025 г.**

Отредактировано **11.03.2025 г.**

Принято **15.03.2025 г.**