

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т.Ф. ГОРБАЧЕВА»

Институт энергетики

Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и
теплотехника» профиль «Промышленная теплоэнергетика»

Кафедра теплоэнергетики

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

*к выпускной квалификационной работе
студентов группы ТЭб-161, 162*

Борисенко Екатерины Игоревны; Носковой Дарьи Игоревны

Тема работы: Проектно-аналитические исследования улавливания CO_2 и SO_x золой уноса ТЭС: в потоке газо-воздушной среды; в плотном слое гранулята, спеченного из золы и золы с добавкой известкового молочка.

Заведующий кафедрой _____ А.Р. Богомолов

Руководитель работы: _____ А.Р. Богомолов

Консультанты:

Кемерово 2020

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Т.Ф.ГОРБАЧЕВА»**

Кафедра теплоэнергетики

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Дата .06.2020

Зав.кафедрой _____
(подпись)

Задание по выпускной квалификационной работе

Студентам Борисенко Екатерине Игоревне; Носковой Дарье Игоревне

1. Тема ВКР: Проектно-аналитические исследования улавливания CO_2 и SO_x золой уноса ТЭС: в потоке газо-воздушной среды; в плотном слое гранулята, спеченного из золы и золы с добавкой известкового молочка.

Утверждена приказом по вузу № 273/09 от 30.04.2020

2. Срок сдачи студентом законченной ВКР 22.06.2020

3. Исходные данные к ВКР: имеется зола уноса с Кемеровской ГРЭС и Ново-Кемеровской ТЭЦ, для рассева и создания гранулята

4. Объем и содержание пояснительной записки (основных) вопросов общей и специальной части) и графического материала: Пояснительная записка содержит 47 страниц машинописного текста, 5 графических частей в виде схем и графиков.

Содержание: Введение; 1. Аналитический обзор; 2. Экспериментальная установка; 3. Расчет характеристик элементов экспериментальной установки; 4. Подбор приборов и оборудования; 5. Тарировка приборов и оборудования; 6. Исследование золы уноса и изготовление гранулята; 7. Анализ результатов изотерм сорбции и десорбции; 8. Заключение.

5. Консультанты по ВКР (с указанием относящихся к ним разделов работы)

1. _____
2. _____

Дата выдачи задания «10» февраля 2020 г.

Руководитель _____
(подпись)

6. Основная литература и рекомендуемые материалы

1. Nor Adillia Rashidi. An overview on the potential of coal-based bottom ash as low-cost adsorbents / Nor Adillia Rashidi, Suzana Yusup // ACS Sustainable Chem. Eng., Just Accepted Manuscript. DOI: 10.1021/acsuschemeng.5b01437. Publication date (web): 23 Feb2016.
2. G-Q. Lu. Adsorption properties of fly ash for NO_x removal from flue gases / G-Q. Lu, D.D. Do // Fuel Processing Technology, 27 (1991) 95-107. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
3. Application of Coal Fly Ash. M. Ahmaruzzaman, and V.K Gupta // Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012.
4. Performance of coal fly ash stabilized, CaO-based sorbents under different carbonation-calcination conditions. Feng Yan, Jianguo Jiang, Kaimin Li, Sicong Tian, Ming Zhao, and Xuejing Chen, 1996.
5. Cyclic performance of waste-derived SiO₂ stabilized, CaO-based sorbents for fast CO₂ capture. Feng Yan, Jianguo Jiang, Kaimin Li, Sicong Tian, Zongwen Liu, Jeffrey Shi, Xuejing Chen, Jingyuan Fei, and Yuxiang Lu, 2016.
6. Catalytic and adsorptive desulphurization of gases. Jadwiga Wieckowska, 1995.
7. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 205. – 358 с.
8. An Overview on the Potential of CoalBased Bottom Ash as Low-Cost Adsorbents. Nor Adilla Rashidi, and Suzana Yusup, 2016.
9. Fly-ash/calcium hydroxide mixtures for SO₂ removal: structural properties and maximum yield. A. Garea, I. Fernhdez, J.R. Viguri, M.I. Ortiz, J. Fernhdez, M.J. Renedo, J.A. Irabien, 1996.
10. Desulfurization rate at low temperatures using calcium hydroxide and fly ash. A. Garea, J.R. Viguri and J.A. Irabien, 1995.
11. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Ленинград: Изд-во “Химия” 1981. – 510 с.
12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник - Машиностроение, 4-е издание: Изд-во “Машиностроение” 1989. - 702 с.
13. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Ленинград: Изд-во “Химия” 1968. - 514 с.
14. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. - 672 с.
15. Carbon Dioxide Thermodynamic Properties Handbook Sara Anwar and John J. Carroll Covering Temperatures from –20° to 250°C and Pressures up to 1000 Bar. Co-published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Salem, Massachusetts. Copyright © 2016 – 604 с.
16. Functionalized Fly Ash Based Alumino-Silicates for Capture of Carbon Dioxide. Vivek Kumar, Nitin Labhsetwar, Siddharth Meshram, and Sadhana Rayalu, 2011.
17. Utilization of fly ashes from the coal burning processes to produce effective low-cost sorbents Agnieszka Adamczuk, and Dorota Koodyska, 2017.
18. Adsorption properties of fly ash particles for NO_x removal from flue gases. G.Q. Lu and D.D. Do, 1991.
19. Removal of Sulfur Dioxide from Flue Gas by the Absorbent Prepared from Coal Ash: Effects of Nitrogen Oxide and Water Vapor. Hiroaki Tsuchiai, Tomohiro Ishizuka, Hideki Nakamura, Tsutomu Ueno, and Hideshi Hattori, 1996.
20. Structural Properties and Reactivities of Ca(OH)₂/Fly Ash Sorbents for Flue Gas Desulfurization. Ren-Bin Lin, Shin-Min Shih, and Chiung-Fang Liu, 2003.
21. CO₂ capture at high temperature using fly ash-derived sodium silicates. Aimaro Sanna, and Mercedes Maroto-Valer, 2016.

Задание принял к исполнению (дата) 10.02.2020 г.

- ПРИМЕЧАНИЕ: 1. Это задание прилагается к законченной ВКР и вместе с ВКР представляется в ГЭК.
2. Кроме задания, студент должен получить от руководителя календарный график работы над ВКР на весь период проектирования (с указанием срока выполнения и трудоемкости отдельных этапов)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Т.Ф.ГОРБАЧЕВА»

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
студента-дипломника

1. Институт энергетики

2. Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
 профиль «Промышленная теплоэнергетика»

3. Кафедра теплоэнергетики

4. Фамилия, имя, отчество (полностью): Борисенко Екатерина Игоревна; Носкова Дарья Игоревна.

5. Тема выпускной квалификационной работы: Проектно-аналитические исследования улавливания CO₂ и SO_x золой уноса ТЭС: в потоке газо-воздушной среды; в плотном слое гранулята, спеченного из золы и золы с добавкой известкового молочка.

6. Руководитель ВКР: Богомолов Александр Романович

7. Консультанты _____

№	ФАМИЛИЯ, ИМЯ, ОТЧЕСТВО	Разделы и специальные вопросы
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

Зав. кафедрой _____

Календарный рабочий план

ЭТАПЫ ИЛИ РАЗДЕЛЫ РАБОТЫ		МЕСЯЦЫ И НЕДЕЛИ																								
		февраль					март					апрель					май					июнь				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1. Составление плана работы				X																						
2. Литературный обзор					X	X	X											X	X							
3. Модернизация лабораторного стенда							X	X																		
4. Рассев золы уноса на фракции				X	X	X	X	X																		
5. Проверка и тарировка оборудования													X	X												
6. Расчет скоростей золы уноса															X	X										
7. Изготовление сорбентов																				X						
8. Анализ результатов																				X	X					
9. Оформление ВКР																						X	X			
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
Дата выдачи 10.02.2020	Срок начала проектирования 10.02.2020	Срок сдачи проекта на кафедру 22.06.2020					Срок защиты в ГЭК 23.06.2020					Приложение					Утверждено: Зав.каф.									

« _____ » _____ 2020 г.

Зав. кафедрой _____

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	8
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	10
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА	18
2.1 Оборудование, принцип работы	18
3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	24
3.1 Расчет скорости витания частиц	24
3.2 Расчет скоростей для воздуха	25
3.3 Расчет скоростей для CO₂	26
4. ПОДБОР ПРИБОРОВ И ОБОРУДОВАНИЯ	27
4.1 Подбор диафрагмы	27
4.2 Подбор воздуходувки	27
4.3 Подбор спирального дозатора	28
5. ТАРИРОВКА ПРИБОРОВ И ОБОРУДОВАНИЯ	29
5.1. Тарировка ротаметра	29
5.2. Тарировка спирального дозатора	30
6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОЛЫ УНОСА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГРАНУЛЯТА	33
6.1. Химический состав летучей золы	33
6.2. Изготовление гранулята	35
7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗОТЕРМ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ	39
8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	46

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Оглавление</i>					
<i>Разработал</i>	<i>Борисенко Е.И.</i>							<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
	<i>Носкова Д.И.</i>							7		
<i>Руководитель</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>							<i>КузГТУ, ИЭ, ТЭД-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>									

ВВЕДЕНИЕ

На настоящее время актуальна проблема газоочистки от вредных газовых выбросов, выделяемых теплоэнергетическими комплексами. Теплогенерирующий комплекс Кузбасса и других соседних регионов развиваются, и снижение вредных выбросов остается острой и первостепенной задачей настоящего и будущего.

В направлении из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации говорится о переходе к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышении эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии.

В России очистке дымовых газов от CO_2 , SO_2 с помощью адсорбентов уделялось недостаточное внимание. В работах зарубежных авторов, например, в [1, 2], обсуждается вопрос об эффективности и экономичности применения адсорбентов, как в сухом, так, и в суспензионном виде на основе использования летучей золы, являющейся продуктом сжигания угольного топлива, в комбинации с гашеной известью, а также алюмосиликатов.

Одним из основных источников загрязнений являются ГРЭС и ТЭЦ. При этом, если для снижения выбросов аэрозолей на большинстве электростанций используются высокоэффективные золоулавливающие устройства (электрофильтры, батарейные циклоны, скрубберы, а в перспективе и рукавные фильтры, обеспечивающие степень улавливания до 99%), то очистка дымовых газов от вредных газовых выбросов в промышленных масштабах пока не внедрена ни на одной ТЭС России.

Под очисткой газового потока понимают отделение от него или превращения в безвредную форму загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу вместе с газовым потоком. Воздушными массами загрязнения

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разработал</i>		<i>Борисенко Е.И.</i>			<i>Введение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>Наскова Д.И.</i>					8	
<i>Руководитель</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭБ-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>						

могут переноситься на большие расстояния и существенно влиять на состояние атмосферы и здоровья человека.

По мере того, как наш мир сегодня становится все более индустриализированным, ископаемые виды топлива, такие как уголь и нефть, играют все более важную роль в энергетическом секторе. В результате сжигания угля для выработки электроэнергии образуются миллионы тонн летучей золы по всему миру. По оценкам, в 2000 году во всем мире было произведено 349 млн. тонн этих отходов. [3] Утилизация такого большого количества летучей золы действительно является сложной задачей и, следовательно, стала серьезной проблемой загрязнения окружающей среды. Летучая зола может рассматриваться как пятый по величине в мире ресурс сырья. Она содержит потенциально токсичные микроэлементы, и поэтому ее удаление является дорогостоящим. В последнее время проводятся дополнительные исследования по утилизации летучей золы с целью предотвращения угрозы для окружающей среды и снижения стоимости её утилизации. Следовательно, было бы разумно использовать данный вид сырья, а не выбрасывать на свалки. Летучая зола, как правило, серого цвета и содержит различные незаменимые элементы, необходимые для роста растений, которые включают в себя как макроэлементы, P, K, Ca и Mg, так и микроэлементы, Zn, Fe, Cu, Mn, B, Mo и т.д. Примерный состав летучей золы – кремнезем SiO_2 (60-65%), глинозем Al_2O_3 (25-30%), магнетит $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ и гематит Fe_2O_3 (6-15%), вюстит FeO. Физико-химические свойства летучей золы, такие как объемная плотность, размер частиц, пористость, водоудерживающая способность, площадь поверхности и т.д., делают его пригодным для использования в качестве сорбента. Хотя летучая зола является отходным материалом, она является ресурсом, который можно полностью использовать и эксплуатировать. Зола может также применяться в качестве недорогого сорбента для удаления загрязнителей воздуха. Изучается также использование летучей золы в сельском хозяйстве и машиностроении.

					ВКР.13.03.01.ПЗ	
Изм.						9

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

При сжигании топлива, на ТЭС, а также обычных котельных, образуются дымовые газы, которые содержат большое количество вредных веществ. Они и являются основной причиной ухудшения экологии на планете.

Нужно проанализировать основные методы очистки дымовых газов от вредных веществ и подобрать наиболее оптимальный метод очистки, для его детального изучения и вследствие применения в промышленных условиях.

Адсорбцией называют процесс поглощения одного или нескольких компонентов из газовой смеси или раствора твердым веществом – адсорбентом. Поглощаемое вещество носит название адсорбата, или адсорбтива.

Адсорбционные процессы (как и другие процессы массопередачи) избирательны и обычно обратимы. Благодаря их обратимости становится возможным выделение поглощенных веществ из адсорбента, или проведение процесса десорбции.

Летучая зола может быть использована для извлечения NOx, SOx, ртути и других газообразных загрязнителей из воздуха и других источников. Также она может применяться в качестве эффективного сорбента для поглощения различных типов загрязнителей воздуха. Свойства CO₂ важны во многих областях, включая инженерию, геологию и химию.

В летучей золе содержится примерно 10-12% несгоревшего компонента, и эти несгоревшие компоненты могут играть важную роль в их способности поглощения.

За исключением воды, углекислый газ является, вероятно, одним из наиболее изученных веществ в науке. Он имеет критическую точку (30,98°C и 73,77 бар), что делает его доступным для изучения. Кроме того, он

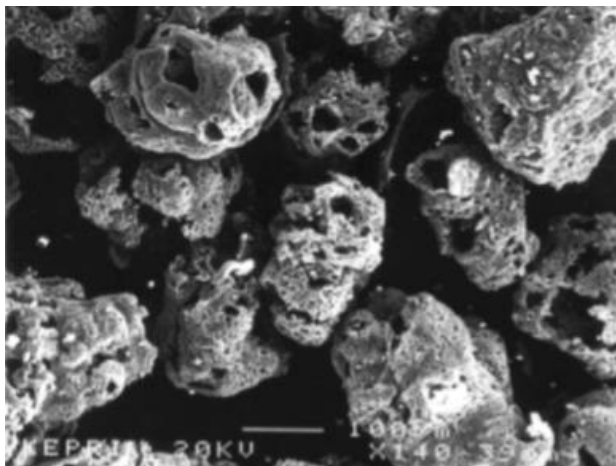
					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разработал</i>		<i>Борисенко Е.И.</i>			<i>Аналитический обзор</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>Носкова Д.И.</i>					10	
<i>Руководитель</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭБ-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>						

аспектов, которые следует учитывать для защиты чистого воздуха от загрязнения.

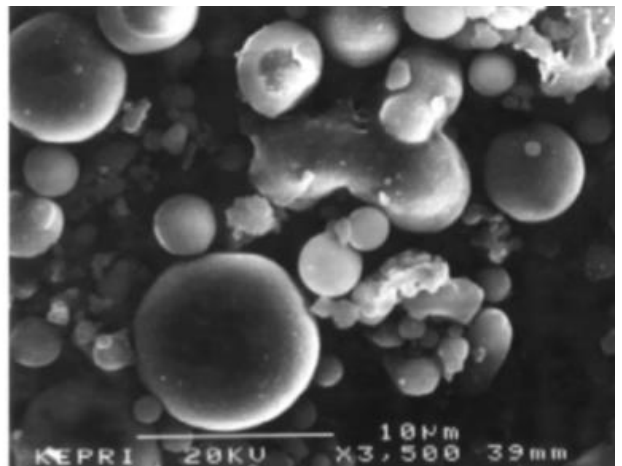
Согласно источнику, [3] был проведен ряд исследований по удалению SO_2 из дымовых газов с использованием летучей золы, а также смеси летучей золы и других материалов. Несмотря на то, что коммерческий активированный уголь обычно использовался для окисления восстановленных оксидов серы, он является дорогостоящим для крупномасштабных экологических применений. Следовательно, вместо коммерческого активированного угля можно использовать угольную золу в качестве дешевого сорбента. Использование летучей золы в качестве источника кремнезема представляет как экономическое, так и благоприятное для окружающей среды преимущество, поскольку его второстепенный продукт получают на всех угольных электростанциях.

Летучая зола может быть интересной альтернативой коммерческому активированному углю для удаления различных загрязнителей воздуха. Эффективность сорбции летучей золы сильно зависит от происхождения золы.

Изображение, полученное с помощью микроскопа SEM (рис. 1), показывает, что частицы летучей золы (размером менее 75 мкм) в основном сферические, тогда как более крупные частицы (размером более 75 мкм) в основном состоят из пористых частиц с нерегулярной структурой. Концентрация углерода, определяемая по потерям при сжигании, составляла менее 3% для частиц летучей золы размером менее 37 мкм и значительно увеличивалась до 58,3% по мере увеличения размера частиц.



(a)



(б)

Рис. 1. (а) – частицы более 75 мкм; (б) – частицы менее 75 мкм

Для сжигания угля признаны два основных класса летучей золы: класс F, обычно производимый из антрацитовых, битумных или суббитуминозных углей и содержащий менее 7 % CaO, и класс C, обычно производимый из бурых углей и содержащий больше извести (5 - 30 %). В химическом составе различных летучих зол содержится SiO_2 и Al_2O_3 , которые составляют около 80% от общей массы летучей золы. В источнике говорится, что содержание Fe_2O_3 и CaO варьируется в пределах примерно от 10% до 13%. Согласно ASTM C618, эта летучая зола может быть классифицирована как класс F с содержанием CaO менее 10% с содержанием SiO_2 более 3%, Al_2O_3 и Fe_2O_3 - более 70%.

С помощью микроскопа получены изображения частиц золы при 10-кратном зуме фракцией 50 – 80 мкм и фракцией 100 – 160 мкм, можно сделать вывод, что частицы летучей золы в основном имеют сферическую форму.

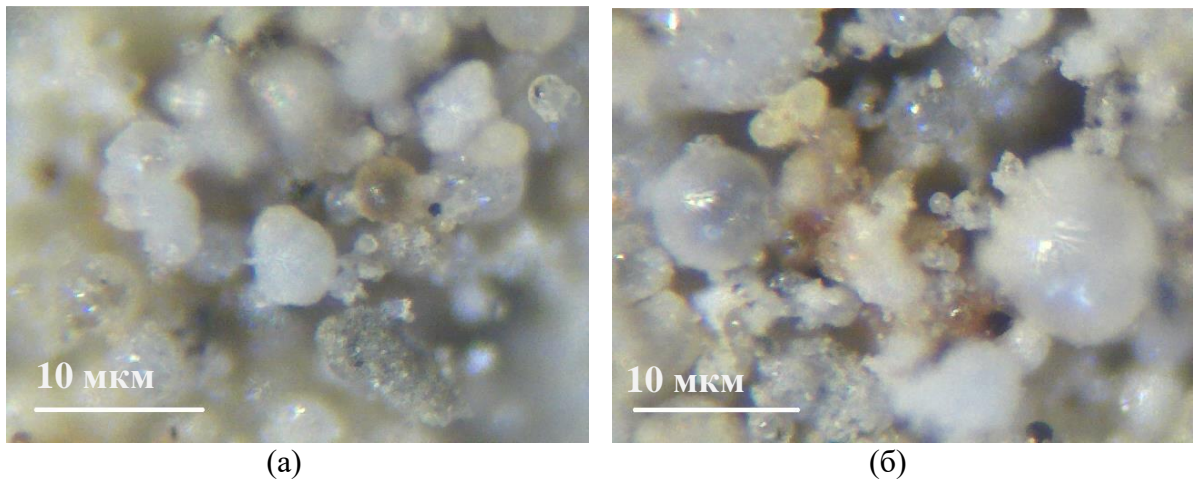


Рис. 2. (а) – частицы золы фракцией 50-80 мкм при 10-кратном зуме; (б) – частицы золы фракцией 100-160 мкм при 10-кратном зуме

В работе [4] угольная летучая зола вводилась в сорбенты на основе СаО путем сухого перемешивания с последующим обжигом, чтобы увеличить сопротивление спеканию. Испытания циклической карбонизации-прокаливания были проведены для изучения угольной летучей золы и кальция на циклическую сорбцию CO_2 . Впоследствии сорбент с лучшей стабильностью был выбран для оценки влияния условий карбонизации-прокаливания на улавливание CO_2 характеристики, включая парциальное давление CO_2 , температуру карбонизации и температуру прокаливания. Эти исследования помогли определить влияние и сравнить результаты с ранее заявленными сорбентами на основе СаО.

По словам автора, [5] кальциевая петлевая технология была определена как одна из наиболее благоприятных для CO_2 методов захвата для осуществления улавливания, утилизации и хранения углерода (CCUS). Однако быстрая дезактивация сорбентов СаО из-за спекания в настоящее время является основным препятствием для этой технологии. Впервые сообщается об экологически благоприятной и экономически эффективной стратегии уменьшить спекание путем добавления отходов производства кремнезема (SiO_2), синтезированного из фотоэлектрических отходов (SiCl_4), в сорбенты на основе СаО с помощью простой процедуры сухого смешивания.

В источнике [6] говорится о неорганических адсорбентах, используемых для удаления H_2S , а также для адсорбции SO_2 из дымовых газов. Наиболее широко используемыми для удаления SO_2 из горячих газов являются негашеная известь (CaO), гашеная известь ($Ca(OH)_2$), зола-уноса, различные виды известняков, такие как доломит, железные руды, гидроксид магния. Оксиды серы могут быть удалены из газа при температуре до 1200 К на оксиде иттрия в сочетании с одним из оксидов следующих элементов: Al, Mg, Zn, Ti или Ca.

Согласно источнику [8] в данной работе изучается потенциал угольной золы в виде твердых адсорбентов. Физико-химические свойства донной золы исследуются с целью более эффективного использования этих промышленных отходов перед повторным применением. Кроме того, описывается перспективность образования донной золы в качестве природного адсорбента в жидкофазных средах. Также был разработан проект с использованием донной золы в качестве нового сырья для производства цеолитов и мезопористого кремнезема.

В [9] были изучены структурные свойства, а именно: определена удельная поверхность и объем пор смешанных твердых веществ, полученных после гидратации $Ca(OH)_2$ под давлением, и летучих веществ. Проведенные эксперименты позволили изучить влияние переменных.

В источнике [10] говорится о хорошей альтернативе для контроля выбросов диоксида серы при низкой температуре с помощью технологии, относительно простой по сравнению с полусухими или влажными методами, которая заключается в непосредственном впрыске сухих сорбентов в канал дымовых газов. Летучая зола от сжигания угля, смешанная с $Ca(OH)_2$, находит все более широкое применение в качестве твердых сорбентов для десульфурации дымовых газов с возможным использованием в качестве реагента для систем впрыска в канале.

В России никто не занимался проблемой очистки дымовых газов от CO_2 , SO_2 с помощью адсорбентов. Проведя анализ работ зарубежных авторов, были выбраны наиболее подходящие способы поглощения вредных выбросов - улавливание диоксида углерода и диоксида серы в газо-воздушном потоке адсорбентом, а также плотным слоем гранулята.

Цель работы:

Проектно-аналитические исследования улавливания CO_2 и SO_2 при инжектировании диспергированного сухого адсорбента в газо-воздушный поток в круглой трубе, а также в плотном слое гранулята, спеченного из золы и золы с добавкой известкового молока.

Задачи исследования:

1. Спроектировать и изготовить экспериментальную установку по улавливанию (адсорбции) диоксида углерода и серы в потоке алюмосиликатного адсорбента;
2. Провести расчет и подбор оборудования;
3. Провести тарировку расходомеров по газу и золе уноса;
4. Приготовление сорбентов на основе золы уноса;
5. Анализ результатов изотерм сорбции и десорбции;
6. Исследование состава золы уноса.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1 Оборудование, принцип работы

Экспериментальная установка в потоке газо-воздушной смеси. Схема и фотографии экспериментальной установки показаны на рис. 3 - 5 по улавливанию (адсорбции) диоксида углерода и серы в потоке мелкодисперсного алюмосиликатного адсорбента.

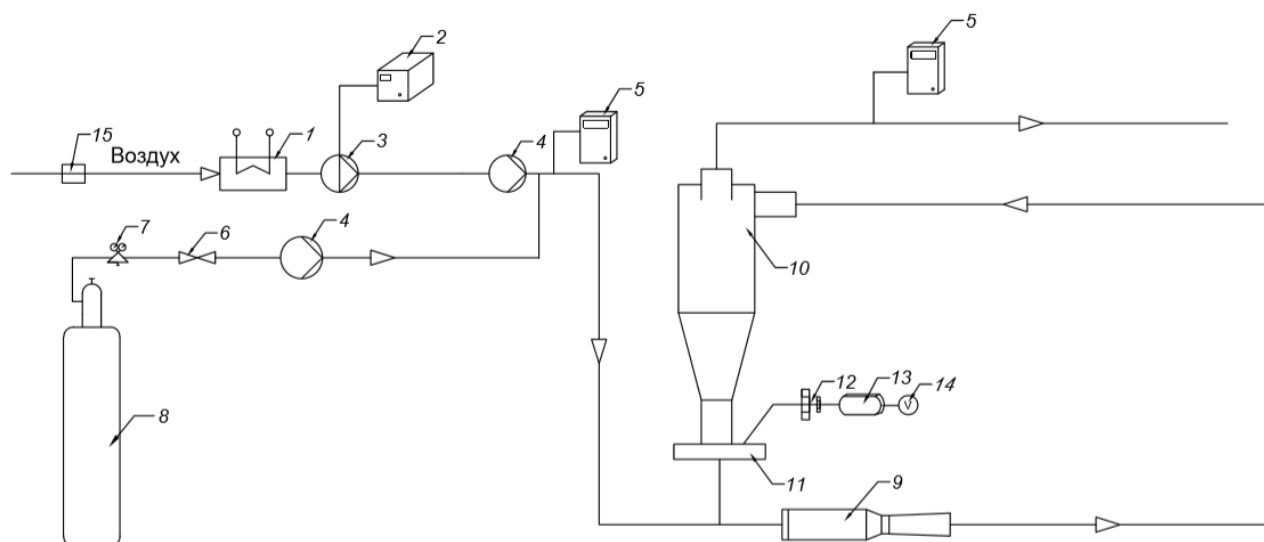


Рис. 3. Схема экспериментальной установки в потоке газо-воздушной среды
 1 – подогреватель воздуха; 2 – частотный преобразователь; 3 – воздуходувка; 4 – расходомер; 5 – газоанализатор; 6 – регулирующий вентиль; 7 – редуктор давления; 8 – баллон с углекислым газом; 9 – скруббер Вентури; 10 – циклон; 11 – спиральный дозатор; 12 – редуктор; 13 – электродвигатель; 14 – лабораторный автотрансформатор;
 15 – психрометр.

Экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 3, предназначена для исследования эффективности улавливания модельного диоксида углерода из газо-воздушной смеси, в потоке которой движется мелкодисперсная зола уноса, выполняющая роль адсорбирующего материала

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разработал	Борисенко Е.И.				Лит.	Лист	Листов
	Носкова Д.И.					18	
Руководитель	Богомолов А.Р.				КузГТУ, ИЗ, ТЭБ-161,162		
Зав. каф.	Богомолов А.Р.						
<i>Экспериментальная установка</i>							

Опыты проводят при различных температурах газо-воздушной среды в диапазоне 20-70°C и расходе от 0,015 до 0,025 м³/с (скорость аэрозоля в трубе от 12 до 20 м/с); концентрациях диоксида углерода в газо-воздушной смеси: от 0,5 до 2%; концентрациях частиц золы уноса в аэрозоле в диапазоне 40-250 г/м³, классах крупности золы уноса: 50-80 и 100-160 мкм.

Удельная поверхность насыпного материала из золы уноса, допуская, что частицы имеют сферическую форму, при среднем диаметре d используемых в опытах фракций 70 и 130 мкм может быть вычислена из условия, что для случайной упаковки, как и для правильной ромбоэдрической, порозность ε составляет 0,395, а твердые частицы занимают объем $\tau = 0,605$ [7]. Суммарную поверхность частиц a , участвующих в процессе адсорбции диоксида углерода, в единице объема называют удельной поверхностью и вычисляют по формуле [3]:

$$a = \frac{6\tau}{d}$$

Расчет показывает, что для фракции со средним диаметром частиц 70 мкм удельная поверхность зернистого слоя составляет $5 \cdot 10^4$ м²/м³, при среднем диаметре 130 мкм – $2,8 \cdot 10^4$ м²/м³. Результаты расчета подтверждают, что чем меньше по размеру зола уноса, тем она обладает большей удельной поверхностью и увеличенной способностью к поглощению вредных выбросов дымовых газов тепловых электрических станций (ТЭС).

Таким образом, золу уноса, участвующую в рецикле для поглощения диоксида углерода, после ее насыщения, направляют на исследование. Опыты позволят получить изотермы сорбции, которые предоставят возможность получить теоретические зависимости для расчета процессов сокращения вредных выбросов в окружающую среду.

В процессе экспериментальных исследований важным обстоятельством является измерение влажности воздуха, направляемого на создание газо-воздушной среды. Влажность воздуха в помещении определяется психрометром 15. Температура и концентрация SO_x и CO₂ в смеси на входе и

выходе из скруббера контролируются газоанализаторами 5 (рис. 3) Testo XXL 350, зонды которых установлены в трубопроводе перед трубой Вентури и на выходе из циклона.

Эксперимент проводится до момента, пока концентрация газов на входе и на выходе не будут равны при различных температурах газовой смеси. Подобные опыты будут проведены с гранулированной золой уноса (обработанной при температуре плавления золы) и гранулированной (обработанной при температуре плавления золы с известковым молочком).

Для проведения экспериментальных исследований по эффективной технологии улавливания вредных выбросов дымовых газов изготовлен стенд экспериментальной установки, который изображен на рис. 4, 5.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки в потоке газо-воздушной среды
 1 – дутьевой вентилятор; 2 – закольцованная система для рецикла золы.

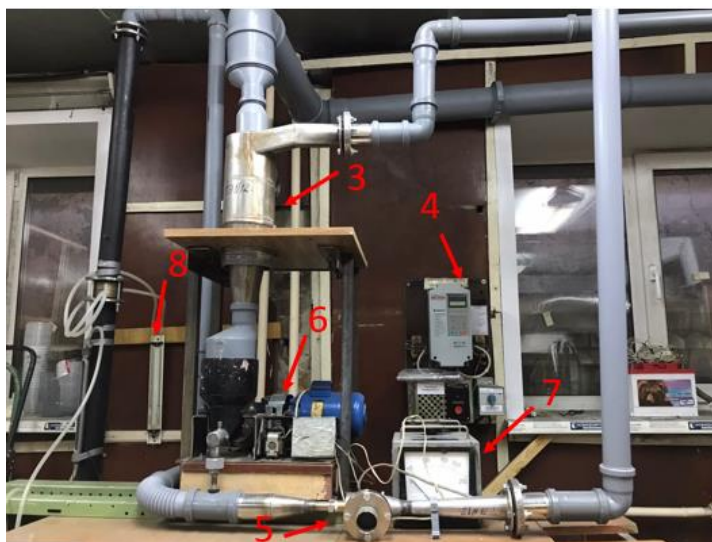


Рис. 5. Основная часть экспериментальной установки
3 – циклон; 4 – частотный преобразователь; 5 – скруббер Вентури; 6 – спиральный дозатор; 7 – вольтметр; 8 – расходомер.

Фундаментальный подход, постановка задачи и эксперимента, полученные изотермы сорбции, дают возможность получения кинетических зависимостей для разработки математической модели процессов адсорбции и десорбции, и расчета на условия работы ТЭЦ.

Помимо экспериментов в потоке газо-воздушной среды будут проводиться опыты с плотным слоем гранулята, спеченного из золы и с добавкой известкового молочка, описание экспериментальной установки и методика проведения исследований представлены ниже.

Экспериментальная установка в плотном слое гранулята, спеченного из золы и с добавкой известкового молочка.

Схема и фотографии экспериментальной установки показаны на рис. 6 по улавливанию (адсорбции) диоксида углерода и серы в плотном слое адсорбента.

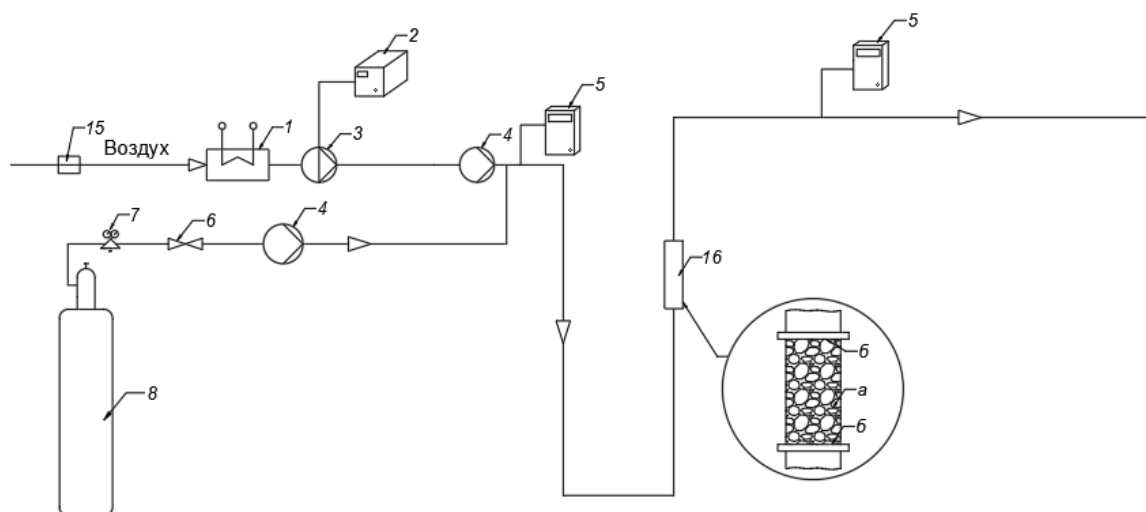


Рис. 6. Схема экспериментальной установки в плотном слое гранулята
 1 – подогреватель воздуха; 2 – частотный преобразователь; 3 – воздуходувка; 4 – расходомер; 5 – газоанализатор; 6 – регулирующий вентиль; 7 – редуктор давления; 8 – баллон с углекислым газом; 16 – плотный слой гранулята; а – слой гранулята; б – металлическая сеточка.

Экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 5, предназначена для исследования эффективности улавливания диоксида углерода из газо-воздушной смеси в плотном слое.

Поток воздуха подают воздуходувкой 3, который проходит через ротаметр 4 и участок трубопровода определенной длины, далее проходя через участок трубы с плотным слоем гранулята, и направляется в окружающую среду. Температуру воздуха регулируют с помощью подогревателя 1.

Для образования газо-воздушной смеси, в частности смеси воздуха и диоксида углерода, как модельного газа – вредного выброса в атмосферу, используют подачу CO_2 из баллона 8 через редуктор 7, регулирующий объемную подачу вентиль 6 и расходомер 4 в участок трубопровода после расходомера воздуха, но перед местом установки газоанализатора 5.

Изм.				

3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

3.1 Расчет скорости витания частиц

Для расчета были приняты следующие данные: плотность воздуха при 20°С $\rho_v=1,204$ кг/м³, плотность частицы $\rho_c=1200$ кг/м³, динамическая вязкость воздуха $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Па·с, ускорение свободного падения $g = 9,8$ м/с².

Расчет скорости витания для фракции 50 - 80 мкм.

Определяем критерий Архимеда [11]:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho \cdot \rho_c^2 \cdot g}{\mu^2 \cdot \rho_c} = \frac{(80 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 1200 \cdot 1,204^2 \cdot 9,81}{(18,1 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,204} = 22,151$$

где $d_c=80 \cdot 10^{-6}$ м - диаметр частицы.

Считаем критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}} = \frac{22,151}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{22,151}} = 1,061$$

Скорость витания частицы рассчитывается по уравнению:

$$w_{\text{вит}} = \frac{Re \cdot \mu_c}{d_c \cdot \rho_c} = \frac{1,061 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}{80 \cdot 10^{-6} \cdot 1,204} = 0,199 \text{ м/с}$$

Расчет скорости витания для фракции 100 - 160 мкм.

Определяем критерий Архимеда [11]:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho \cdot \rho_c^2 \cdot g}{\mu^2 \cdot \rho_c} = \frac{(160 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 1200 \cdot 1,204^2 \cdot 9,81}{(18,1 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,204} = 177,206$$

где $d_c=160 \cdot 10^{-6}$ м - диаметр частицы.

Считаем критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar}} = \frac{177,206}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{177,206}} = 6,784$$

Скорость витания частицы рассчитывается по уравнению:

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разработал</i>		<i>Борисенко Е.И.</i>			<i>Расчет характеристик элементов экспериментальной установки</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>Носкова Д.И.</i>					24	
<i>Руководитель</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭБ-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>						

$$w_{\text{вит}} = \frac{Re \cdot \mu_c}{d_q \cdot \rho_c} = \frac{6,784 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}{160 \cdot 10^{-6} \cdot 1,204} = 0,637 \text{ м/с}$$

В целях устранения отложений золы уноса на стенках труб, создаем предпочтительные условия, принимая решение, что скорость должна быть значительно больше.

3.2 Расчет скоростей для воздуха

Для расчета были приняты следующие данные: плотность воздуха при 20°C $\rho=1,204 \text{ кг/м}^3$, перепад давления в ротаметре $\Delta p=200 \text{ Па}$ (20 мм вод. ст.), диаметр диафрагмы $d_d=37,3 \text{ мм}$, диаметр трубы $d_{\text{тр}}=50 \text{ мм}$, поправочный множитель $\varepsilon=0,98$.

По уравнению рассчитывается расход воздуха Q_o , ($\text{м}^3/\text{ч}$) [12]:

$$Q_o = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d_d^2 \cdot \sqrt{\Delta p / \rho} = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7644 \cdot 0,98 \cdot 37,3^2 \cdot \sqrt{200/1,204} = 53,712 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $m = 0,6$ – относительная площадь сужающего устройства;

$\alpha = 0,7644$ - коэффициент расхода сужающего устройства при $m = 0,6$.

Рассчитывается скорость подачи воздуха в трубе w , м/с:

$$w = \frac{Q_o}{S_{\text{тр}}} = \frac{53,712}{1962,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 7,603 \text{ м/с}$$

где $S_{\text{тр}}$ – площадь сечения трубы, мм^2

$$S_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 50^2}{4} = 1962,5, \text{ мм}^2$$

По m среди множества стандартных Re по методу аппроксимации выбирается наиболее приближенное значение к расчетному Re .

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{тр}} \cdot \rho}{\mu} = \frac{7,603 \cdot 50 \cdot 1,204}{18,1 \cdot 10^{-6}} = 25285,986$$

где μ – динамическая вязкость воздуха при 20 °С, $\text{Па} \cdot \text{с}$

3.3 Расчет скоростей для CO₂

Для расчета были приняты следующие данные: плотность CO₂ при 20°С ρ=1,8419 кг/м³, перепад давления в ротаметре Δр=200 Па (20 мм вод. ст.), диаметр диафрагмы d_д=37,3 мм, диаметр трубы d_{тр}=50 мм, поправочный множитель ε=0,98

По уравнению рассчитывается расход CO₂ Q_о, (м³/ч):

$$Q_o = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d_d^2 \cdot \sqrt{\Delta p / \rho} = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7644 \cdot 0,98 \cdot 37,3^2 \cdot \sqrt{200 / 1,8419} = 43,426 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

где m = 0,6 – относительная площадь сужающего устройства;

α = 0,7644 - коэффициент расхода сужающего устройства при m = 0,6.

Рассчитывается скорость подачи CO₂ в трубе w, м/с:

$$w = \frac{Q_o}{S_{тр}} = \frac{43,426}{1962,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 6,147 \text{ м/с}$$

4. ПОДБОР ПРИБОРОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

4.1 Подбор диафрагмы

Относительная площадь сужающего устройства определяется по формуле:

$$m = \frac{d_d^2}{d_{тр}^2} = \frac{(37,3 \cdot 10^{-3})^2}{(48 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6$$

По методу аппроксимации определен подходящий критерий Re, а, следовательно, и значение коэффициента расхода сужающего устройства $\alpha = 0,7644$ [12].

Принимаем стандартную диафрагму с диаметром $d_d = 37,3$ мм.

4.2 Подбор воздуходувки

Для расчета были приняты следующие данные: длина трубопровода $l = 12,5$ м, диаметр трубопровода $d_{тр} = 50$ мм, значения коэффициентов местного сопротивления: поворот на 90° $\xi = 0,4$; циклон $\xi = 0,05$; скруббер Вентури $\xi = 0,072$; диафрагма стандартная $\xi = 2,24$ [14].

С технико-экономической точки зрения принимаем скорость $w = 7,603$ м/с.

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d_{тр}} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} + \sum \xi \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} =$$
$$0,02 \cdot \frac{12,4}{0,5} \cdot \frac{1,204 \cdot 7,603^2}{2} + (12 \cdot 0,4 + 0,05 + 0,072 + 2,24) \cdot \frac{1,204 \cdot 7,603^2}{2}$$
$$= 266,491 \text{ Па}$$

где $\lambda = 0,02$ – коэффициент сопротивления трения.

По рассчитанному перепаду давления находим расход газо-воздушной смеси:

$$Q_o = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d_d^2 \cdot \sqrt{\Delta p / \rho} = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7644 \cdot 0,98 \cdot 37,3^2 \cdot \sqrt{266,491 / 1,204} = 62,001 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разработал</i>		<i>Борисенко Е.И.</i>			<i>Подбор приборов и оборудования</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>Носкова Д.И.</i>					27	
<i>Руководитель</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭб-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>						

По рассчитанному расходу воздуха подобран вентилятор радиальный высокого давления (воздуходувка) ВЦ 8-13 №5.

4.3 Подбор спирального дозатора

Расход газо-воздушной смеси из расчетов составляет:

$$Q_o = 53,712 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расчет концентраций произведен на основании тарифовочных данных, которые представлены в разделе 5.

Концентрация для фракции 50-80 мкм:

$$C = \frac{G}{Q_o} = \frac{0,0005}{0,015} = 0,034 \text{ кг/м}^3$$

где G, кг/с – расход золы уноса.

Вычисления для фракции 100-160 мкм проводится соответствующе.

Данные расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения концентраций золы

Фр. 50-80 мкм		Фр. 100-160 мкм	
G, кг/сек	C, кг/м ³	G, кг/сек	C, кг/м ³
0,0005	0,0342	0,0006	0,0400
0,0010	0,0674	0,0010	0,0643
0,0016	0,1090	0,0015	0,1003
0,0017	0,1130	0,0014	0,0942
0,0020	0,1312	0,0018	0,1172
0,0022	0,1477	0,0019	0,1285
		0,0019	0,1252

При фракционном составе 50 - 80 мкм концентрация золы уноса в газо-воздушной смеси будет изменяться в диапазоне от 0,0342 кг/м³ до 0,1477 кг/м³, а для фракции 100 – 160 мкм от 0,0400 кг/м³ до 0,1252 кг/м³.

5. ТАРИРОВКА ПРИБОРОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

5.1. Тарировка ротаметра

Для проведения точных измерений необходимо знать расход поглотителя, для этого установлен расходомер в виде ротаметра. Нижняя трубка ротаметра подключается к баллону с углекислым газом. Подача углекислого газа регулируется вентилем и датчиками. Верхняя трубка, в свою очередь, подключается к барабанному счетчику. При прохождении газа через ротаметр, поплавков устанавливается на некотором количестве делений, которое фиксируется после чего высчитывается расход газа. После ротаметра газ поступает в барабанный счетчик, который измеряет объем подаваемого газа.

Температура и состав газовой смеси контролируется с помощью газоанализаторов. Расход воздуха рассчитывается из показателей U-образно трубки.

Для измерения влажности используется психрометр, который состоит из сухого и влажного термометров.

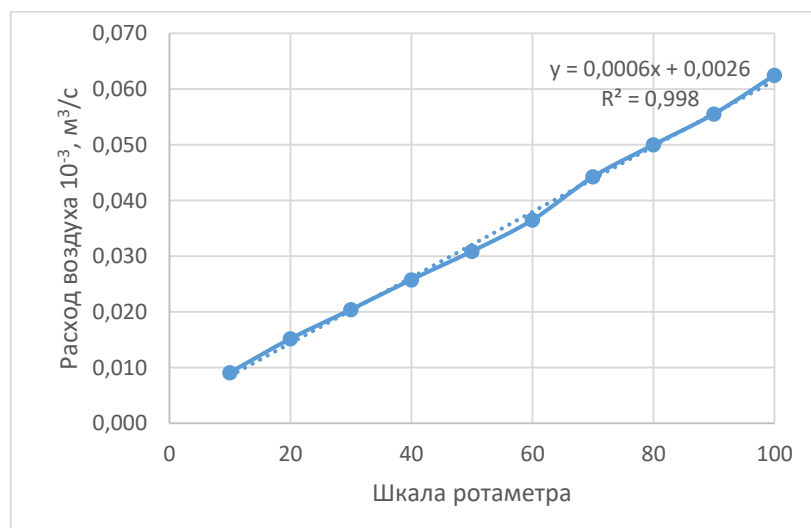


Рис. 7 – График тарировки ротаметра

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разработал</i>	<i>Борисенко Е.И.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
	<i>Носкова Д.И.</i>					29	
<i>Руководитель</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭб-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>						
<i>Тарировка приборов и оборудования</i>							

Получив линейное уравнение зависимости шкалы ротаметра от расхода воздуха, имеется возможность высчитать расход CO_2 , а, следовательно, и его объемную долю в газовой смеси.

Линейное уравнение имеет вид:

$$y = 0,0006x + 0,0026$$

По графику были выбраны промежуточные значения шкалы ротаметра (25, 60, 75)

Таким образом, расход CO_2 :

$$y = 0,0006 \cdot 25 + 0,0026 = 0,0176 \text{ л/с} = 0,0000176 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$y = 0,0006 \cdot 60 + 0,0026 = 0,0386 \text{ л/с} = 0,0000386 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$y = 0,0006 \cdot 75 + 0,0026 = 0,0476 \text{ л/с} = 0,0000476 \text{ м}^3/\text{с}$$

Объемная доля определяется:

$$\varphi = \frac{Q_{\text{в-ва}}}{Q_{\text{см}}} = \frac{0,0000176}{(0,0000176 + 0,015)} \cdot 100\% = 0,118$$

$$\varphi = \frac{Q_{\text{в-ва}}}{Q_{\text{см}}} = \frac{0,0000386}{(0,0000386 + 0,015)} \cdot 100\% = 0,258$$

$$\varphi = \frac{Q_{\text{в-ва}}}{Q_{\text{см}}} = \frac{0,0000476}{(0,0000476 + 0,015)} \cdot 100\% = 0,318$$

где $Q_{\text{в-ва}}$ - расход вещества (CO_2);

$Q_{\text{см}}$ - расход смеси газа.

5.2. Тарировка спирального дозатора

Для определения расхода адсорбента производится тарировка спирального дозатора.

В бункер засыпается зола уноса. Скорость вращения спирали дозатора регулируется подачей напряжения на электродвигатель. По шкале вольтметра устанавливается напряжение. С каждой последующей серией опытов изменяется напряжение на вольтметре с целью построения графика тарировки. График тарировки необходим для выявления наиболее подходящих

параметров. В ходе проведения опытов засекается время. Увеличение времени способствует уменьшению погрешности.

Для определения расхода на выходе из спирального дозатора ставится тара, в которую сыпается зола уноса, после чего адсорбент взвешивается за вычетом массы тары.

Опыты проводятся с фракциями 50-80 мкм и 100-160 мкм.

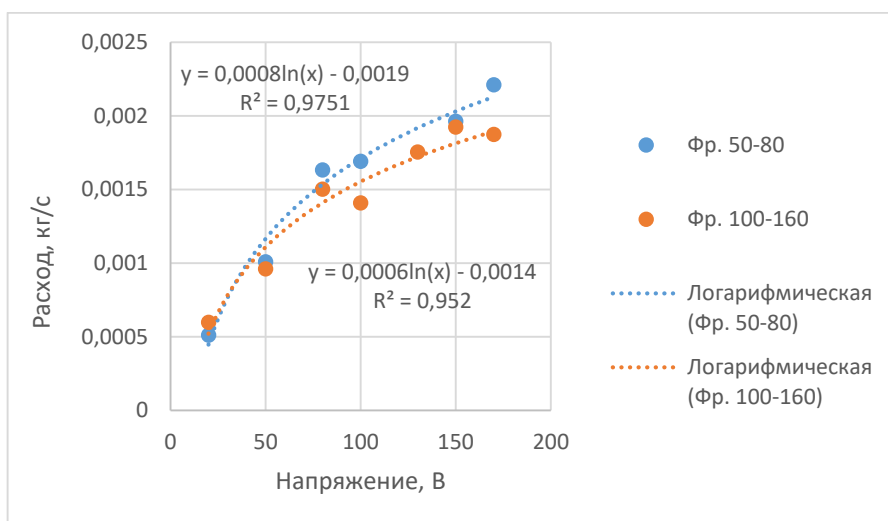


Рис. 8– График тарировки спирального дозатора с фракциями 50-80 мкм и 100-160 мкм

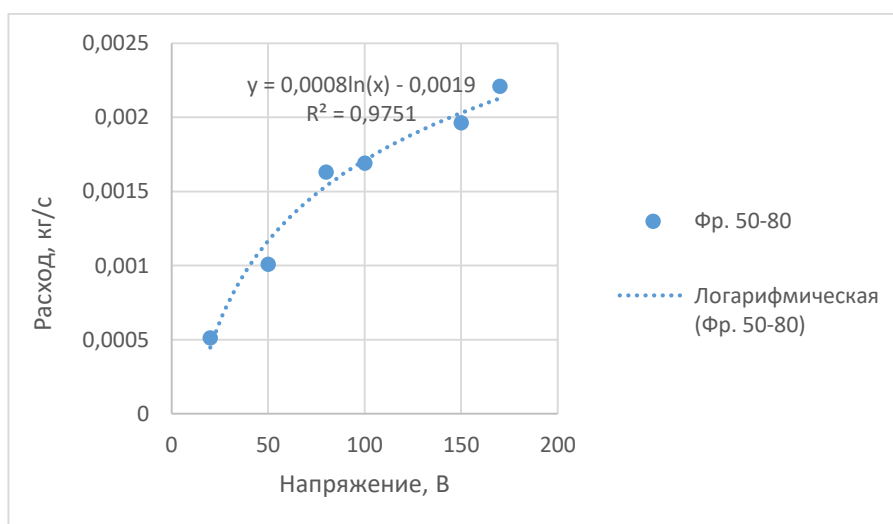


Рис. 9- График тарировки спирального дозатора с фракциями 50-80 мкм

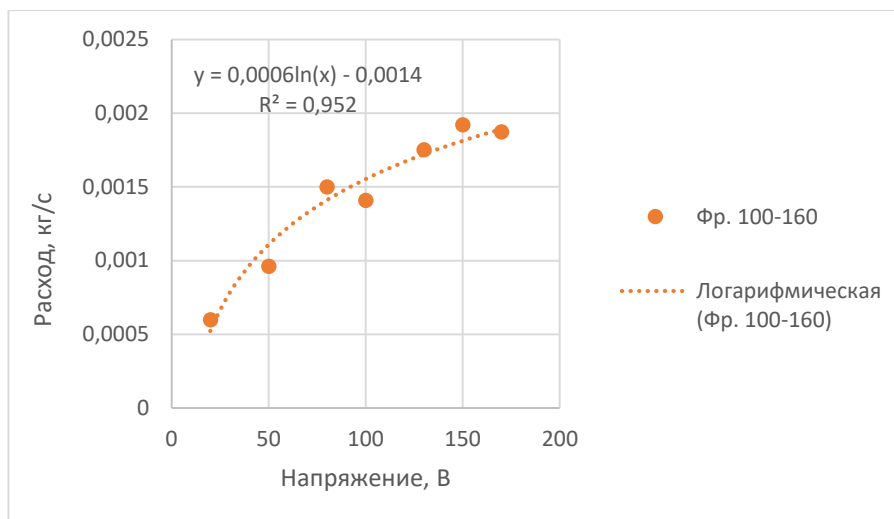


Рис. 10 – График тарировки спирального дозатора с фракциями 100-160 мкм

Расход золы уноса в газо-воздушной смеси для фракции 50 - 80 мкм располагается в диапазоне от 0,0005 кг/с до 0,0022 кг/с, а для фракции 100 - 160 мкм от 0,0006 кг/с до 0,0019 кг/с.

Исходя из полученных результатов, выбраны три значения напряжения (20 В, 70 В, 120 В). При больших значениях напряжения спиральный дозатор не выполняет своих функций, перемалывая зольные частицы вместо их подачи в газо-воздушный поток.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОЛЫ УНОСА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГРАНУЛЯТА

6.1. Химический состав летучей золы

На основании аналитического обзора было принято решение применять в качестве адсорбента вредных выбросов из дымовых газов золу уноса. В данной работе использовалась зола с Кемеровской ГРЭС и Ново-Кемеровской ТЭЦ. Пробы с этих предприятий были направлены в центр коллективного пользования (ЦКП) для анализа состава золы.

Таблица 2. Анализ золы

№	Элемент												Всего
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	
1	31,07	32,55	0,41	0,61	7,76	16,92	0,18	1,19	0,99	1,81	0,38	6,15	100
2	9,62	43,3	0,76	0,96	10,54	22,15	0,27	2,22	1,25	2,11	0,45	6,37	
3	14,65	41,12	0,67	0,76	10,5	24,05	0,33	0,14	1,73	2,25	0,53	3,25	
4	13,34	41,98	0,51	0,76	10,73	24,82	0,3	0,16	1,8	1,89	0,58	3,13	
№	Соединение												Всего
	C		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	
1	31,07		0,55	1,01	14,66	36,2	0,4	2,97	1,2	2,53	0,63	8,79	100
2	9,62		1,03	1,6	19,91	47,38	0,61	5,53	1,51	2,95	0,75	9,11	
3	14,65		0,91	1,26	19,85	51,46	0,76	0,35	2,09	3,15	0,88	4,64	
4	13,34		0,68	1,27	20,28	53,09	0,69	0,4	2,16	2,65	0,96	4,48	

Номера строк 1 и 2 - состав золы уноса с Ново-Кемеровской ТЭЦ, номера строк 3 и 4 - состав золы уноса с Кемеровской ГРЭС.

Зола, взятая в разное время с одного и того же предприятия, имеет разный состав. Исходя из работ зарубежных авторов, важными соединениями являются алюмосиликаты и оксиды кремния, составляющие большую часть из общей массы. Результаты анализа золы представлены в таблице 2.

Был произведен рассев фракций 50 – 80 мкм и 100 – 160 мкм для последующих опытов в потоке газо-воздушной среды. Данные представлены в таблицах 3,4 и на графиках 11,12.

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разработал</i>	<i>Борисенко Е.И.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
	<i>Носкова Д.И.</i>					33	
<i>Руководитель</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>Исследование золы уноса и изготовление гранулята</i>		
<i>Зав. каф.</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>						

Таблица 3. Гранулометрический состав
зола уноса НК ТЭЦ

Фракция, мкм	Процент от общей массы, %
больше 250	14,792
200-250	1,886
160-200	2,085
100-160	8,504
80-100	17,935
50-80	5,659
меньше 50	40,966

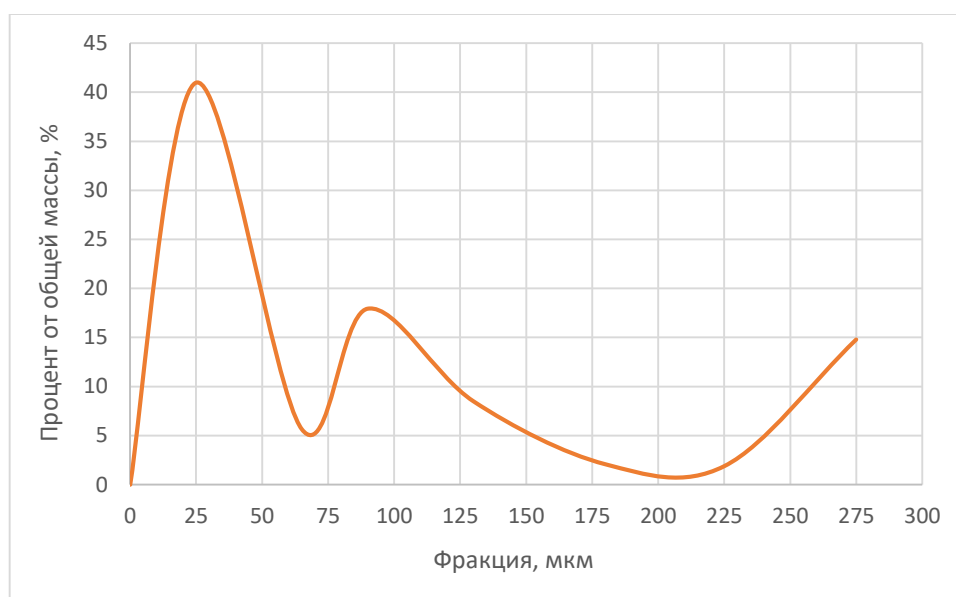


Рис. 11 – График распределения золы уноса НК ТЭЦ

Таблица 4. Гранулометрический состав
зола уноса Кемеровской ГРЭС

Фракция, мкм	Процент от общей массы, %
больше 250	0,132
200-250	0,264
160-200	0,825
100-160	6,069
80-100	6,431
50-80	15,666
меньше 50	66,326

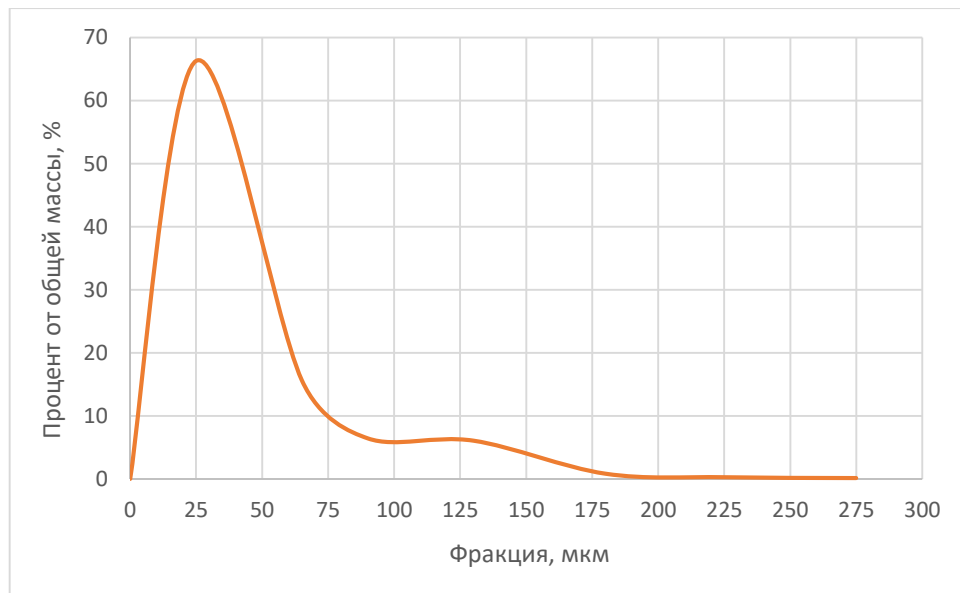


Рис. 12 – График распределения золы уноса Кемеровской ГРЭС

На основании фракционного состава с двух предприятий, принято решение для экспериментов в газо-воздушном потоке взять золу уноса с НК ТЭЦ под номером строки 2 (табл. 2), а для проведения экспериментов в плотном слое золу уноса с Кемеровской ГРЭС под номером строки 3 (табл. 2).

6.2. Изготовление гранулята

Для изготовления гранулята потребуется смесь золы фракции 0 - 100 мкм и известковой пасты в отношении 1:1. Полученную смесь разделяем на мелкие порции, помещаем в тару из нержавеющей стали и запекаем в течении 20 минут при температуре 1020°С. После спекания гранулят дробится на мелкие гранулы размером 3 – 4 мм.

Гранулят без известкового молока изготавливается по такому же принципу с применением воды.

С использованием микроскопа с 40-кратным зумом были зафиксированы поры гранулята.

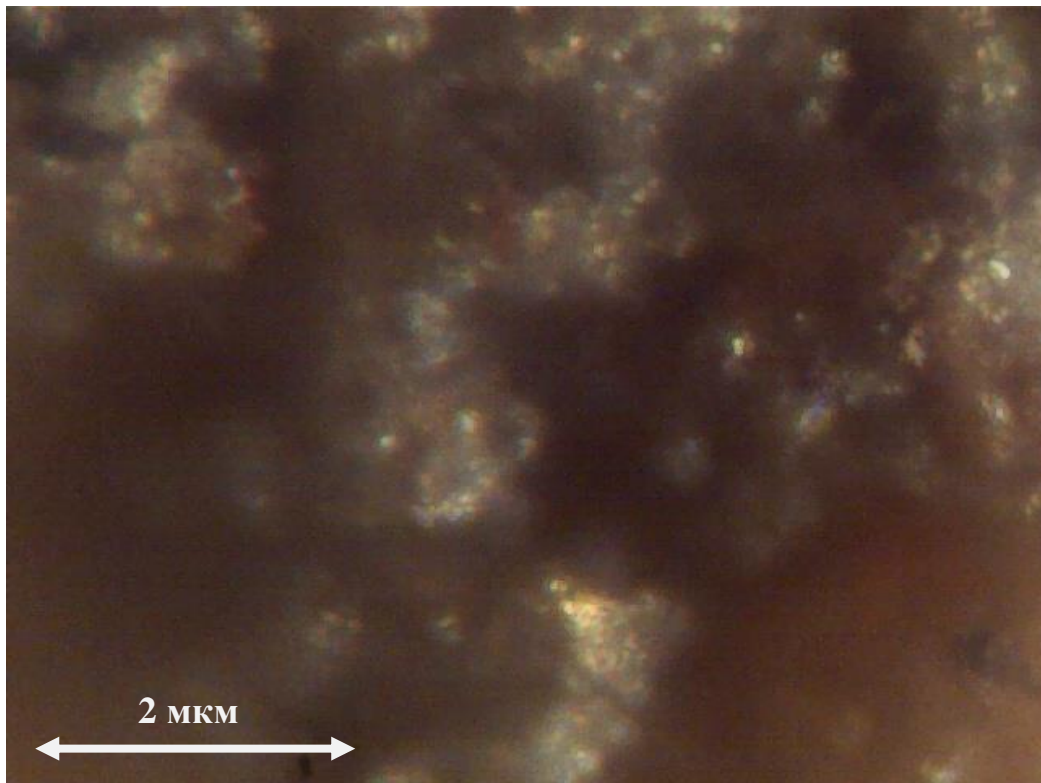


Рис. 13 – Гранулят с известковым молочком при 40-кратном зуме

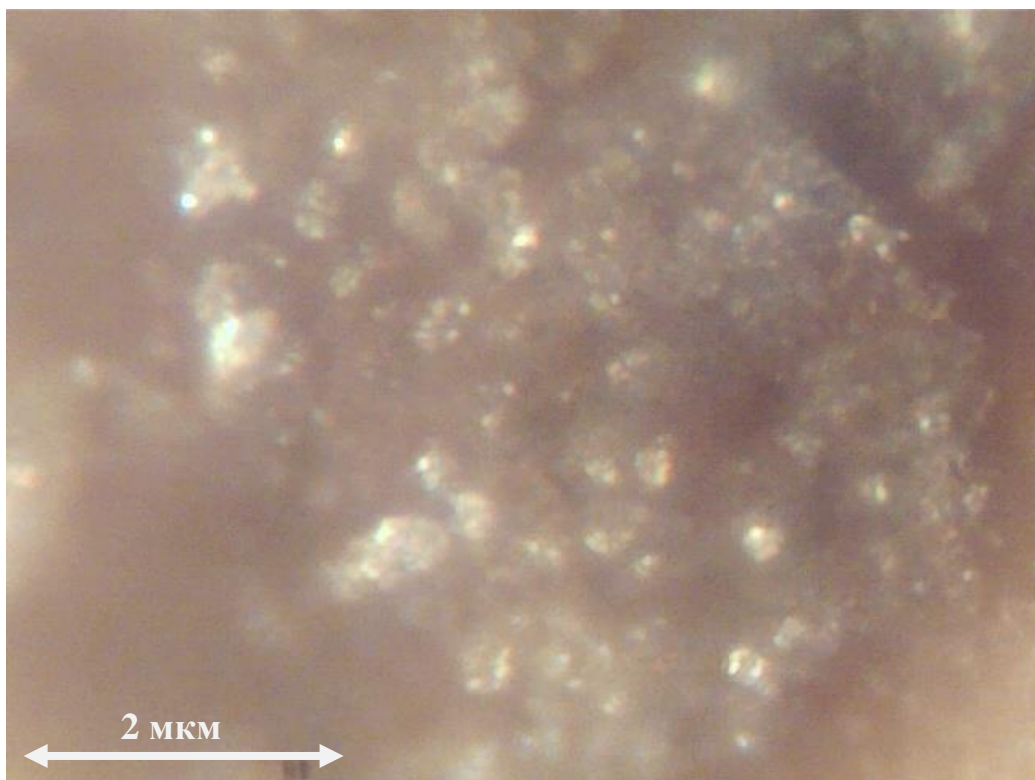


Рис. 14 – Гранулят без известкового молочка при 40-кратном зуме

На рисунке 14 размер пор больше, чем на рисунке 13. Это объясняется тем что в случае гранулята с известковым молочком произошло спекание.

Для расчета были приняты следующие данные: плотность частицы $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость воздуха $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, диаметр частицы $d_{\text{ч}} = 4 \text{ мм}$, высота плотного слоя в трубе $l = 5 \text{ см}$, пористость зернистого слоя $\varepsilon = 0,4$

По уравнению Эргуна определяем перепад давления ΔP (Па) в зернистом слое [13]:

$$\Delta P = l \cdot \left(150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot w}{d^2} + 1,75 \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{d} \right) =$$

$$= 5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(150 \cdot \frac{(1 - 0,4)^2}{0,4^3} \cdot \frac{18,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1}{(4 \cdot 10^{-3})^2} + 1,75 \cdot \frac{1 - 0,4}{0,4^3} \cdot \frac{1200 \cdot 0,1^2}{4 \cdot 10^{-3}} \right) =$$

$$= 2465,710 \text{ Па}$$

где $w = 0,1; 0,2 \dots 2 \text{ м/с}$ – скорость газо-воздушной смеси

Таблица 5. Значения перепада давления в зависимости от скорости газо-воздушной смеси

w, м/с	ΔP , Па	w, м/с	ΔP , Па
0,1	2465,71	1,1	297826
0,2	9853,2949	1,2	354432
0,3	22162,755	1,3	415960
0,4	39394,09	1,4	482411
0,5	61547,3	1,5	553783
0,6	88622,385	1,6	630076
0,7	120619,34	1,7	711292
0,8	157538,18	1,8	797430
0,9	199378,89	1,9	888489
1	246141,47	2	984470

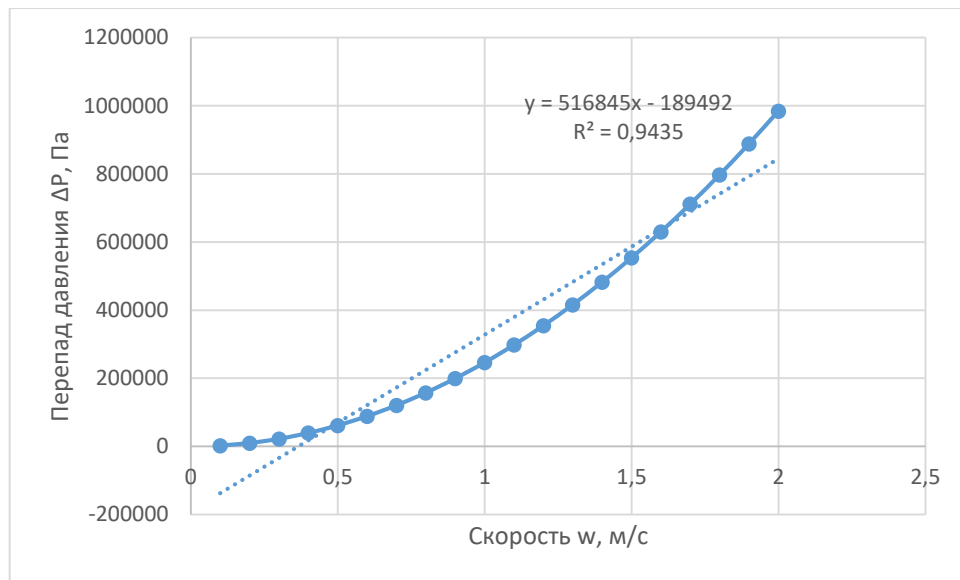


Рис. 15. График зависимости перепада давления в зависимости от скорости газо-воздушной смеси

Изм.				

7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗОТЕРМ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ

В целях определения скорости поглощения газовой среды адсорбентом, проведено исследование текстурных характеристик образцов. Зола уноса была передана в центр коллективного пользования (ЦКП) на исследование мезопор сорбции и десорбции. Изотерма сорбции и десорбции проводится на приборе в среде азота. В качестве образца №1 был передан гранулят без добавления известкового молочка, образец №2 – гранулят с известковым молочком. Результаты аналитического исследования текстурных характеристик исследованных образцов представлены ниже.

Исследование предоставленных образцов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на объёмной вакуумной статической установке ASAP-2020 «Micromeritics». Величину удельной поверхности ($S_{\text{ВЕТ}}$, $\text{м}^2/\text{г}$) образцов получали из анализа изотерм адсорбции-десорбции N_2 при -196°C (77K). Перед проведением адсорбционных измерений исследуемые образцы сначала высушивали в сушильном шкафу при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ до постоянной массы, а затем вакуумировали непосредственно в специальном порту прибора при 110°C , в течение 12 часов до остаточного давления не более $5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. Измерения изотерм адсорбции-десорбции азота проводили в области равновесных относительных давлений паров от 10^{-3} до $0,995 P/P_0$. Удельную поверхность пор рассчитывали по методу Брунауэра-Эммета-Тейлора (ВЕТ). Объем микропор определяли с помощью сравнительного метода t -Plot. Объем мезопор определяли с помощью метода Баррета-Джойнера-Халенды (ВЖ). Средний диаметр пор оценивали по формуле $D_{\text{cp}} = 4V_{\text{адс}}/S$, по методу ВЕТ. Объем мезопор рассчитывали из распределения мезопор по размерам (метод ВЖ). Ошибка измерений составляет 5-7%.

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разработал</i>		<i>Борисенко Е.И.</i>			<i>Анализ результатов изотерм сорбции и десорбции</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>Носкова Д.И.</i>					39	
<i>Руководитель</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭД-161,162</i>		
<i>Зав. каф.</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>						

Полученные текстурные характеристики, а именно значения удельной поверхности ($S_{ВЕТ}, м^2/г$), объемов пор (суммарный объем пор - $V_{\Sigma}, см^3/г$; объем микро- и мезопор $V_{микро}, V_{мезо}, см^3/г$) и среднего диаметра пор ($D_{pores}, \text{Å}$) исследованных образцов приведены в таблице:

№ образца	Образец	$S_{ВЕТ}, м^2/г$	$V_{\Sigma}, см^3/г$	$V_{микро}, см^3/г$	$V_{мезо}, см^3/г$	$D_{pores}, \text{Å}$
1	Образец №1	0,13	$2,61 \cdot 10^{-4}$	$0,43 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-4}$	55
2	Образец №2	1,32	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$0,046 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	143

На рисунках 16 и 18 представлены изотермы адсорбции-десорбции азота исследуемых образцов, а на рисунке 17 и 19 - кривые распределения мезопор по размерам (методом ВЈН) для исследуемых образцов.

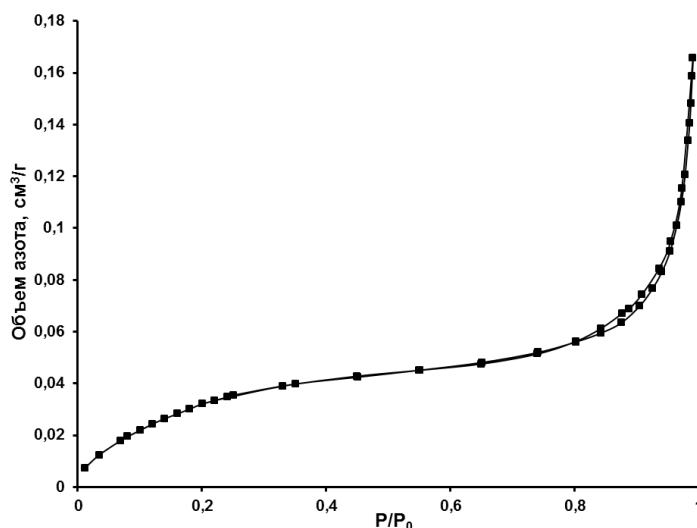


Рис. 16. Изотерма адсорбции-десорбции азота образцом №1

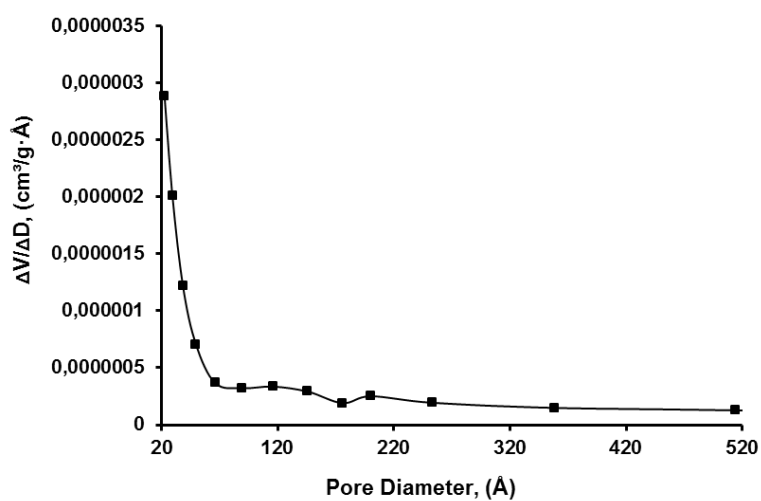
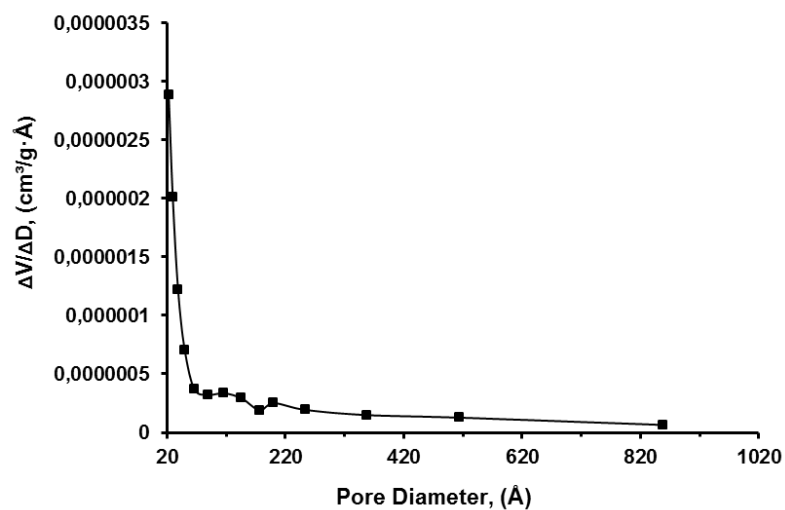


Рис. 17. Кривая распределения мезопор по размерам для образца №1

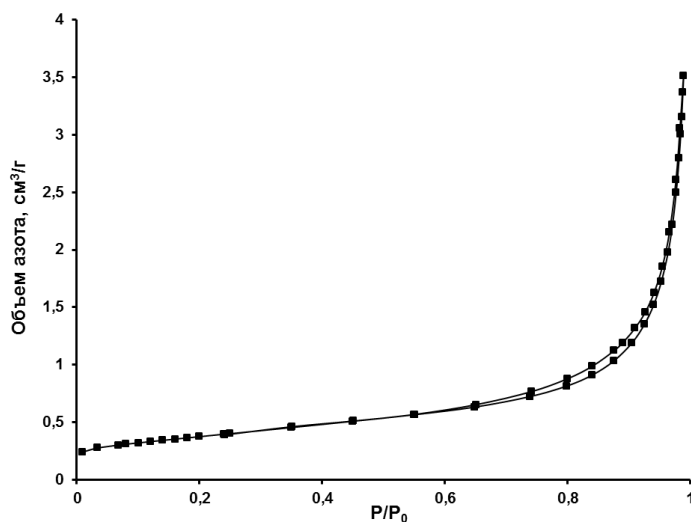


Рис. 18. Изотерма адсорбции-десорбции азота образцом №2

Изм.				

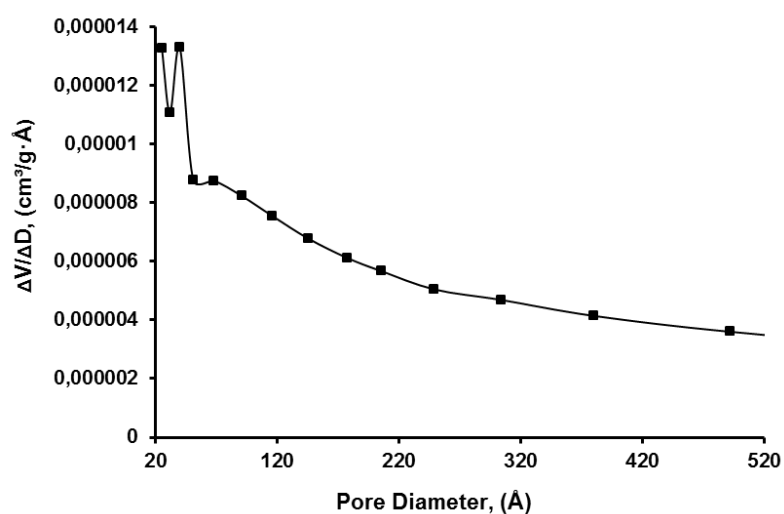
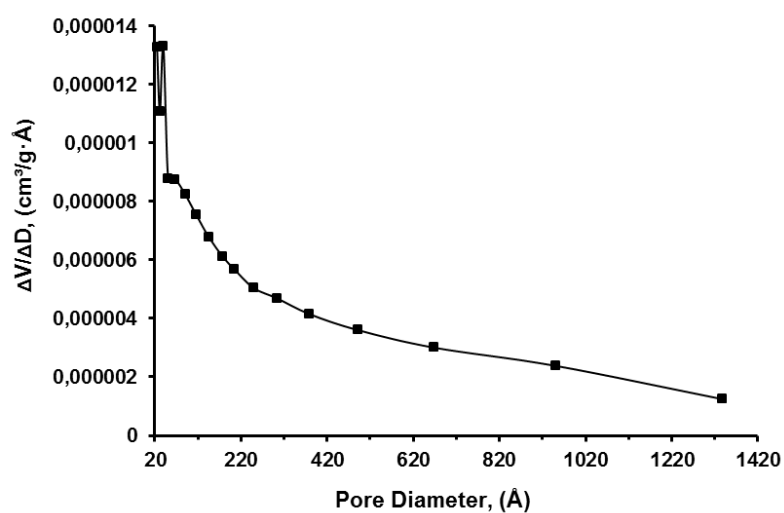


Рис. 19. Кривая распределения мезопор по размерам для образца №2

Согласно полученным экспериментальным данным, можно сказать, что исследуемые образцы характеризуются мезопористой структурой, что видно из изотерм адсорбции-десорбции азота, которые относятся к IV типу по классификации IUPAC. Кроме того, на представленных изотермах наблюдаются петли капиллярно-конденсированного гистерезиса, согласно классификации IUPAC, по внешнему виду которых можно судить о формах и типах пористой структуры исследуемых образцов. Для всех исследуемых образцов характерен тип НЗ капиллярно-конденсированного гистерезиса,

указывающий на то, что в образцах имеются щелевидные мезопоры, состоящие из плоскопараллельных частиц.

По кривым рапределения мезопор по размерам (методом ВЈН) для исследуемых образцов можно увидеть, что формирование мезопористого пространства происходит за счет мезопор диаметром 20-500Å. Следует отметить, что для образца №1 на кривой распределения пор по размерам имеется ярко выраженный максимум ~ 23Å. Для образца №2 на кривой распределения пор по размерам имеется два максимума ~ 25Å и 40Å. Полученные данные позволяют нам говорить о том, что формирование мезопористого пространства в образце №2 происходит в основном за счет мезопор диаметром ~ 25 и 40Å.

По результатам исследования диаметр мезопор образца №2 больше, чем у образца №1. Следовательно, можно предположить о лучшей адсорбционной способности у гранулята с добавлением известкового молочка.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проектно-аналитических исследований, можно выделить следующее:

1. Изготовлена экспериментальная установка по улавливанию (адсорбции) диоксида углерода и серы в потоке алюмосиликатного адсорбента. Разработана схема экспериментальной установки в плотном слое гранулята, спеченного из золы и с добавкой известкового молочка.

2. Произведен расчет скорости витания частиц для создания предпочтительных условий в целях устранения отложений золы уноса на стенках труб, расчет скоростей для воздуха и углекислого газа. При подборе приборов и оборудования была принята стандартная диафрагма с диаметром $d_d=37,3$ мм, произведен расчет воздухоудовки при расходе газо-воздушной смеси $Q_0 = 62,001$ м³/ч, исходя из расчетов подобран вентилятор радиальный высокого давления ВЦ 8-13 №5, а также подобран спиральный дозатор.

3. Для проведения точных измерений выполнена тарировка расходомеров по газу и золе уноса. Исходя из результатов тарировки ротаметра, получена зависимость расхода воздуха от шкалы ротаметра, по этой зависимости была рассчитана объемная доля CO₂ в газо-воздушной смеси. Проведя тарировку спирального дозатора, были определены три наиболее подходящих значения напряжения (20 В, 70 В, 120 В).

4. Для опытов улавливания CO₂ и SO_x в потоке газо-воздушной среды был проведен рассев на фракции 50 – 80 мкм и 100 – 160 мкм. Зола уноса для рассева взята с Ново-Кемеровской ТЭЦ. Опыты улавливания в плотном слое подразумевают изготовление гранулята, спеченного из золы и с добавкой известкового молочка. Для этого использовалась зола фракцией 0 – 100 мкм с Кемеровской ГРЭС.

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>						
<i>Разработал</i>		<i>Борисенко Е.И.</i>			<i>Заключение</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
		<i>Носкова Д.И.</i>								44
<i>Руководитель</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>			<i>КузГТУ, ИЗ, ТЭб-161,162</i>					
<i>Зав. каф.</i>		<i>Богомолов А.Р.</i>								

5. В целях определения скорости поглощения газовой среды адсорбентом, проведено исследование текстурных характеристик образцов. Для этого в центр коллективного пользования (ЦКП) были переданы образцы гранулята. По результатам исследования диаметр мезопор больше у образца с известковым молочком, таким образом, адсорбционная способность этого образца лучше.

6. Исходя из полученных данных, важными соединениями являются алюмосиликаты и оксиды кремния, составляющие большую часть из общей массы. На основании фракционного состава с двух предприятий, принято решение для экспериментов в газо-воздушном потоке взять золу уноса с НК ТЭЦ, а для опытов в плотном слое гранулята золу уноса с Кемеровской ГРЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nor Adillia Rashidi. An overview on the potential of coal-based bottom ash as low-cost adsorbents / Nor Adillia Rashidi, Suzana Yusup // ACS Sustainable Chem. Eng., Just Accepted Manuscript. DOI: 10.1021/acsuschemeng.5b01437. Publication date (web): 23 Feb2016.
2. G-Q. Lu. Adsorption properties of fly ash for NO_x removal from flue gases / G-Q. Lu, D.D. Do // Fuel Processing Technology, 27 (1991) 95-107. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
3. Application of Coal Fly Ash. M. Ahmaruzzaman, and V.K Gupta // Industrial & Engineering Chemistry Research
4. Performance of coal fly ash stabilized, CaO-based sorbents under different carbonation-calcination conditions. Feng Yan, Jianguo Jiang, Kaimin Li, Sicong Tian, Ming Zhao, and Xuejing Chen
5. Cyclic performance of waste-derived SiO₂ stabilized, CaO-based sorbents for fast CO₂ capture. Feng Yan, Jianguo Jiang, Kaimin Li, Sicong Tian, Zongwen Liu, Jeffrey Shi, Xuejing Chen, Jingyuan Fei, and Yuxiang Lu
6. Catalytic and adsorptive desulphurization of gases. Jadwiga Wieckowska
7. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 205. – 358 с.
8. An Overview on the Potential of CoalBased Bottom Ash as Low-Cost Adsorbents. Nor Adilla Rashidi, and Suzana Yusup
9. Fly-ash/calcium hydroxide mixtures for SO₂ removal: structural properties and maximum yield. A. Garea, I. Fernhndez, J.R. Viguri, M.I. Ortiz, J. Fernhndez, M.J. Renedo, J.A. Irabien
10. Desulfurization rate at low temperatures using calcium hydroxide and fly ash. A. Garea, J.R. Viguri and J.A. Irabien

					<i>ВКР.13.03.01.ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разработал</i>	<i>Борисенко Е.И.</i>				<i>Библиографический список</i>		
	<i>Носкова Д.И.</i>						
<i>Руководитель</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>				<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Зав. каф.</i>	<i>Богомолов А.Р.</i>				46		
					<i>КузГТУ, ИЭ, ТЭБ-161,162</i>		

11. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Ленинград: Изд-во “Химия” 1981. – 510 с.

12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник - Машиностроение, 4-е издание: Изд-во “Машиностроение” 1989. - 702 с.

13. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. – Ленинград: Изд-во “Химия” 1968. - 514 с.

14. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. - 672 с.