

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 222.001.01 на базе ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»)  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

г. Москва

21 января 2016 года

**Председатель** диссертационного совета – доктор технических наук, профессор  
Тумановский А.Г.

**Ученый секретарь** диссертационного совета – доктор технических наук,  
Березинец П.А.

**Тумановский А.Г.:** Уважаемые члены диссертационного совета, сегодня на рассмотрение представлена работа Строкова Андрея Александровича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» на тему: «Исследование очистки от сероводорода с помощью минеральных хемосорбентов генераторного газа, сжигаемого в энергетических парогазовых установках с газификацией углей». На заседании присутствует 16 членов совета из 21, утвержденных ВАК. По специальности 05.14.14 – 9.

Список присутствующих на заседании ДС:

1.	Тумановский Анатолий Григорьевич (председатель совета)	д.т.н., 05.04.12
2.	Ольховский Гурген Гургенович (заместитель председателя)	д.т.н., 05.04.12
3.	Березинец Павел Андреевич (ученый секретарь совета)	д.т.н., 05.14.14
4.	Агабабов Владимир Сергеевич	д.т.н., 05.14.14
5.	Аракелян Эдик Кайрунович	д.т.н., 05.14.14
6.	Балабан-Ирменин Юрий Викторович	д.т.н., 05.14.14
7.	Богачев Владимир Алексеевич	д.т.н., 05.14.14
8.	Гладштейн Владимир Исаакович	д.т.н., 05.04.12
9.	Горлов Евгений Григорьевич	д.т.н., 05.14.14
10.	Грибин Владимир Георгиевич	д.т.н., 05.04.12
11.	Гринь Евгений Алексеевич	д.т.н., 05.14.14
12.	Корнеев Сергей Дмитриевич	д.т.н., 05.14.14
13.	Куличихин Владимир Васильевич	д.т.н., 05.04.12

14.	Куменко Александр Иванович	д.т.н., 05.04.12
15.	Трухний Алексей Данилович	д.т.н., 05.04.12
16.	Шварц Анатолий Лазаревич	д.т.н., 05.14.14

**Официальные оппоненты:**

Шпирт Михаил Яковлевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки ордена Трудового Красного Знамени института нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН).

Николайкина Наталья Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» института инженерной экологии и химического машиностроения им. Л.А. Костандова Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ).

Оба оппонента присутствуют на заседании.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»), кафедра паровых и газовых турбин.

**Научный руководитель** – кандидат технических наук Епихин Андрей Николаевич, заведующий лабораторией очистки газов от оксидов серы отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций ОАО «ВТИ».

Слово для зачитания справки по предстоящей защите предоставляется секретарю диссертационного совета Павлу Андреевичу Березинцу.

*Березинец П.А.:*

Строков Андрей Александрович 1982 года рождения. В 2004 году окончил Московский государственный университет инженерной экологии (ныне институт инженерной экологии и химического машиностроения имени Констандова Московского государственного машиностроительного университета) по специальности «Инженер-эколог городского хозяйства».

В 2007 году поступил на работу в ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский

институт» в лабораторию очистки газов от оксидов серы отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций, где работает в настоящее время в должности научного сотрудника.

В 2012 году окончил очную аспирантуру при ОАО «ВТИ» по специальности защищаемой диссертации 05.14.14.

По результатам работ, выполненных Строковым А.А., в отделении защиты атмосферы выпущено около 20 отчетов. Соискатель имеет 11 публикаций, в том числе: по теме диссертации – 9, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 5 работ, в сборниках докладов всероссийских конференций – 2.

В опубликованных работах достаточно полно отражены концепция и основные положения диссертационной работы.

Предварительная защита диссертации состоялась 21 мая 2015 года на расширенном заседании НТС отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций с участием ведущих специалистов других отделений ОАО «ВТИ». Имеется выписка из протокола №3, где отмечено, что работа выполнена на высоком профессиональном уровне, отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и рекомендована к защите по специальности «Тепловые электрические станции». Выписка подписана заведующей отделением защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций Брагиной Ольгой Назаровной и утверждена первым заместителем генерального директора Тумановским Анатолием Григорьевичем.

26 октября 2015 года диссертационная работа была рассмотрена на заседании комиссии Диссертационного совета (протокол №3) и принята к защите.

Представленные документы соответствуют установленным требованиям.

Тумановский А.Г.: Есть ли вопросы к Павлу Андреевичу? Нет вопросов. Спасибо, Павел Андреевич. Слово предоставляется Строкову Андрею Александровичу.

Строков А.А.: Здравствуйте, уважаемые члены диссертационного совета, оппоненты, коллеги. Тема моей диссертационной работы уже была озвучена, я кратко изложу ее содержание.

Парогазовые установки с газификацией угля являются наиболее перспективной технологией переработки угля с целью получения тепловой и электрической энергии. Они обладают высоким КПД и хорошими экологическими характеристиками.

Их активно развивают за рубежом, однако высокая стоимость такой технологии ограничивает её применение.

Одним из путей снижения удельной стоимости таких установок, а также повышения их КПД является использование высокотемпературной сероочистки полученного при газификации генераторного газа.

Основными методами сероочистки на сегодняшний день являются хорошо освоенные абсорбционные методы, достоинства и недостатки которых представлены на слайде 2, где также показаны плюсы и минусы технологических и хемосорбционных методов.

Хемосорбцию сероводорода при высоких температурах проводят оксидами металлов. Работы в этом направлении ведутся, однако предлагаемые хемосорбенты на основе оксидов никеля, цинка и железа являются синтетическими, а значит дорогими.

Поэтому целью настоящей работы стало исследование процесса высокотемпературной сероочистки генераторного газа с помощью руд, содержащих в своем составе активные к сероводороду и достаточно широко распространенные в природе компоненты – железо и марганец.

В задачи работы входило проведение комплекса экспериментальных исследований руд, а также разработка на основе полученных результатов технических решений по сероочистке и технико-экономическая оценка предлагаемого метода.

Научная новизна работы состоит в том, что подобные исследования железомарганцевых руд месторождений России были проведены впервые.

Практическая значимость работы – в том, что полученные результаты могут быть использованы при разработке в России парогазовых установок с

газификацией углей и позволят снизить удельные капитальные затраты и повысить КПД установки.

Основным требованием к хемосорбентам сероводорода является высокая сероёмкость. Кроме того, они должны быть селективными (то есть, не поддерживать побочных химических реакций), прочными, пригодными для регенерации и утилизации, доступными и дешевыми.

Для исследований были отобраны семь железомарганцевых руд (пять континентальных и две океанические). Название месторождений, их территориальная расположенность и запасы месторождений представлены на слайде 6.

На слайде 7 представлен химический состав железомарганцевых руд.

Для этих руд были определены такие физико-механические характеристики, как микродвёрдость, удельная поверхность, пылеунос при 500 °С. Наиболее прочной является руда Аскизского месторождения (А), а наибольшей удельной поверхностью обладает руда Порожинского месторождения (П).

Как говорилось ранее, основным показателем хемосорбентов является их сероёмкость, то есть динамическая активность к сероводороду. На слайде 9 представлены обобщенные данные по динамической активности для всех семи руд. На слайде видно, что руды Полярного и Ванданского месторождений имеют малую сероёмкость, не превышающую 112 мг/г (для сравнения: промышленные синтетические хемосорбенты имеют эту величину на уровне 250 мг/г и более), поэтому их далее не использовали. По причине спекания из дальнейших исследований были исключены кобальтоносные марганцевые корки и руда Николаевского месторождения.

Таким образом, для дальнейших исследований были выбраны руды Аскизского и Порожинского месторождений, а также океанические железомарганцевые конкреции. Состав этих руд (исходных и отработанных) в пересчете на оксиды и общую серу представлены на слайде 11. Наличие значительного количества сульфидов марганца и железа в отработанных образцах подтверждает протекание процесса химической сорбции. Выбранные для дальнейших исследований

природные хемосорбенты испытывались на стендовой установке при очистке реального генераторного газа, получаемого газификацией нефтяного кокса.

Схема стендовой установки показана на слайде 12. Она состоит из газификатора «горнового» типа, системы пылеочистки газа и реактора сероочистки с плотным слоем минерального хемосорбента.

Усредненный состав генераторного газа и условия проведения испытаний показаны на слайде 13.

Особенностью этих экспериментов было ограниченное время устойчивой работы газификатора, не превышавшее двух часов, вследствие чего не удалось получить данных по динамической сероёмкости материалов.

В результате были получены данные по степени очистки газа от сероводорода. Из слайда 14 видно, что все хемосорбенты обладают высокой степенью очистки газа, превышающей 95 %. Таким образом, была доказана возможность очистки реального генераторного газа от сероводорода выбранными природными хемосорбентами.

Регенерация отработанных хемосорбентов окислительным методом проводилась во Всероссийском институте минерального сырья и показала, что они регенерируются и восстанавливаются, хотя и не на 100 %.

Важным показателем применимости хемосорбентов является их селективность, то есть взаимодействие только с сернистыми соединениями. При этом все другие химические реакции, которые приводят к снижению калорийности газа, должны быть исключены. К таким реакциям относятся реакции восстановления оксидов металлов и реакции разложения компонентов генераторного газа.

Исследование побочных химических реакций проводилось на лабораторной установке, схема которой представлена на слайде 16, а условия проведения экспериментов – на слайде 17.

Обобщенные результаты исследования показаны на слайде 18. В качестве выходного параметра использовались потери химического тепла газа, определяемые с учетом концентраций и мольных расходов топливных компонентов модельного газа. На слайде видно, что для руды Порожинского

месторождения и железомарганцевых конкреций потери химического тепла во всем интервале температур значительны и только для руды Аскизского месторождения при температуре 500 °С потери химического тепла газа практически не наблюдается. Таким образом, по результатам проведенных исследований всем предъявляемым к хемосорбентам требованиям соответствует только руда Аскизского месторождения, обладающая довольно высокой активностью к сероводороду, высокой прочностью, селективностью и способностью к регенерации.

На мощных ПГУ с газификацией угля сероочистку генераторного газа необходимо проводить не в плотном слое, а в режиме кипящего слоя или в пневмотранспортном режиме. Поэтому были проведены испытания оптимального природного хемосорбента (руды Аскизского месторождения) для сероочистки модельного генераторного газа в режиме кипящего слоя на установке, схема которой представлена на слайде 19. На слайде 20 показана фотография реактора кипящего слоя с электрической печью, на слайде 21 – условия проведения экспериментов.

На слайде 22 показаны графики изменения степени очистки модельного генераторного газа от сероводорода для экспериментов при различной температуре. Видно, что с ростом температуры хемосорбционная активность растет, так же как и динамическая сероёмкость хемосорбента, составляющая при 500 °С 17,4 %, а при 600 °С 25,6 % массовых, что сопоставимо с динамической ёмкостью синтетических поглотителей. При этом во всём интервале исследованных температур практически отсутствуют потери химического тепла газа.

Характеристики оптимального природного хемосорбента сероводорода представлены на слайде 24. Это высокая динамическая сероёмкость, селективность, высокая механическая прочность, доступность и дешевизна.

Отработанный хемосорбент регенерируется окислением кислородом воздуха с получением обжигового газа, содержащего SO<sub>2</sub>. Возможна также микробиологическая регенерация.

Непригодный к дальнейшему использованию отработанный хемосорбент, содержащий марганец, является сырьём для металлургических предприятий.

Оптимальный природный хемосорбент – руда Аскизского месторождения – может применяться для сероочистки генераторного газа не только на ПГУ с газификацией, но также для других случаев, например, при использовании синтетического газа газификации угля в твердооксидных топливных элементах или для синтеза химических продуктов, таких как метанол и моторные топлива. В этих случаях для обеспечения необходимой чистоты газа по сернистым соединениям необходима дополнительная очистки синтетическими хемосорбентами.

На слайде 27 представлены разработанные в диссертации технические решения по сероочистке генераторного газа для ПГУ с газификацией угля малой и большой мощности.

Соответствующие принципиальные схемы сероочистки представлены на слайдах 28 и 29. Для ПГУ малой мощности предлагается получение гипса в качестве побочного продукта сероочистки, для ПГУ большой мощности – пиросульфита натрия.

Для второй схемы ПГУ с газификацией мощностью 470 МВт с применением высокотемпературной сероочистки выбранным природным хемосорбентом был проведен технико-экономический расчет с определением удельных капиталовложений и КПД парогазовой установки, и проведено её сравнение с аналогичной системой, в которой сероочистка осуществляется широко используемым моноэтаноламиновым методом с получением серы по методу Клауса. Результаты сравнения представлены на слайде 30. По расчетам КПД установки за счет применения сухой сероочистки повышается более чем на 2 %, а удельные капиталовложения в установку сероочистки сокращаются в 4 раза.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- экспериментальным путем найден оптимальный хемосорбент природного происхождения для сероочистки генераторных газов;

- цена на этот хемосорбент вследствие его природного происхождения в десятки раз ниже стоимости синтетических хемосорбентов;

- на основе полученных результатов разработаны технические решения и технологические схемы установок сероочистки генераторного газа для парогазовых установок с газификацией угля, для твёрдооксидных топливных элементов и предприятий химического синтеза;

- расчеты показали, что при использовании предлагаемого метода можно добиться повышения КПД энергетической парогазовой установки и снижения удельных капитальных затрат на установку сероочистки.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Вопросы, пожалуйста.

Рябов Г.А.: Скажите, пожалуйста, какой диаметр частиц, выбранных для применения железомарганцевых руд, в плотном и кипящем слое?

Строков А.А.: На слайде показаны рекомендуемые диаметры частиц хемосорбентов. Для плотного слоя – 1-3 мм, а для кипящего слоя размер определяется расходом газа и составляет 0,25-1 мм.

Рябов Г.А.: Еще один вопрос. Как обстоит дело с истираемостью этих частиц, в частности в кипящем слое, в котором происходит их механическое взаимодействие, истираемость и пылеунос? Насколько они прочны?

Строков А.А.: Прочность была определена как микротвёрдость руд, которая оказалась наиболее высокой как раз для руды Аскизского месторождения. Пылеунос определялся при температуре 500 °С в течении часа и для этой руды был невелик. Поэтому можно говорить о том, что эта руда будет устойчива в кипящем слое и истираемость будет минимальной.

Гладштейн В.И.: Андрей Александрович, в нескольких отзывах есть замечания о том, что вы не даете оценки погрешностей проведенных экспериментов. В то же время я увидел у вас обработку результатов с целью получения зависимостей. В чем причина того, что не предусмотрели оценку погрешностей?

Строков А.А.: Действительно, в диссертации не приводится оценка погрешностей. В опытах по исследованию побочных реакций при определении концентраций топливных компонентов газа хроматографическим методом

погрешность не превышала 15 %, а при определении концентрации сероводорода химическим йодометрическим методом погрешность не превышала 20 %.

Трухний А.Д.: Конкурентом этих методов являются суперсверхкритические параметры пара. Что вы скажете об экономичности этих установок?

Тумановский А.Г.: Вы имеете в виду парогазовые установки с газификацией, я так понимаю?

Трухний: Да.

Строков А.А.: Такое сравнение мы не проводили.

Тумановский А.Г.: Речь идет о будущем применении парогазовых установок с газификацией и их конкурентоспособности по сравнению с другими возможными силовыми установками. К тому времени, когда появятся такие установки, будут уже работать и блоки на суперкритические параметры пара с приличными КПД.

Трухний А.Д.: Будем надеяться.

Строков А.А.: Да, на данный момент они не выдерживают конкуренции, и в нашей стране таких установок нет. Моя работа направлена на то, чтобы повысить их конкурентоспособность, снизить удельную стоимость и повысить КПД.

Тумановский А.Г.: К этому же вопросу. Вы нашли эффективные сорбенты с точки зрения поглощения сернистых соединений, а как по стоимости, по экономии?

Строков А.А.: Пока не определена стоимость этой руды, потому что она не добывается и никто эту руду не покупает. Но если принимать цену по максимуму, то есть равной стоимости марганцевой руды, покупаемой за рубежом, даже с учетом повысившегося доллара...

Тумановский А.Г.: А что, эту руду надо покупать за рубежом?

Строков А.А.: Нет, это если сравнивать.

Тумановский А.Г.: Если говорить об океанических конкрециях, которые вы тоже использовали и которые добывают с морского дна, то экономический эффект ваших сорбентов есть.

Строков А.А.: Даже если принимать цену на наш хесосорбент по максимуму, то есть равной цене на марганцевую руду, покупаемую за рубежом за доллары, то

всё равно она будет ниже стоимости синтетических отечественных хемосорбентов, стоимость которых 200 рублей за килограмм, более чем в 10 раз. Поэтому экономический эффект есть. А если добывать руду у нас в стране (месторождение в Хакасии), то разница в цене будет уже в сотни раз.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Еще вопросы.

Тугов А.Н.: По сути у нас только развиваются парогазовые установки с газификацией, причем мы уже долго работаем в этой области. Вопрос такой: как за рубежом решается вопрос очистки генераторных газов от сероводорода? в чем смысл очистки от сероводорода самого синтез-газа? связано ли это только экологией и с надежностью работы последующей камеры сгорания газовой турбины?

Строков А.А.: За рубежом наиболее распространённым методом является мокрые абсорбционные методы сероочистки, которые осуществляются при температуре ниже 40 °С. Они хорошо освоены, эффективны, но имеют свои недостатки, снижают КПД установки. Очищать генераторный газ от сероводорода необходимо из-за сероводородной коррозии оборудования и образования SO<sub>2</sub> при сжигании сероводорода.

Тугов А.Н.: Имеется в виду высокотемпературная сероводородная коррозия? А как насчет других видов коррозии? В чем заключается опасность от содержания в газе сероводорода?

Строков А.А.: Содержание сероводорода в газе также снижает КПД установки, а также образование при сжигании сероводорода SO<sub>2</sub> создает возможность для коррозии дальнейшего оборудования по тракту.

Тумановский А.Г.: Еще вопросы.

У меня есть вопрос. В результате исследований вы нашли оптимальное температурное окно для очистки газа от сернистых соединений. Это как-то может повлиять на экономичность цикла или это оптимальная температура для описания тепловой схемы всей ПГУ?

Строков А.А.: Для «горнового» газификатора, после которого генераторный газ имеет температуру 500 °С, это температура является оптимальной. Для поточных

газификаторов температура генераторного газа выше, поэтому необходимо газ охлаждать, что скажется на КПД, но все-таки охлаждать нужно не до таких температур, как при абсорбционной сероочистке. При этом при температуре 500-600 °С будут сохраняться водяные пары и не будет конденсации смол, что исключит необходимость установки очистки водных стоков, загрязненных вредными веществами.

Тумановский А.Г.: То есть, это оптимальный уровень для того чтобы строить тепловую схему всей установки?

Строков А.А.: Да, оптимальный, опять же с учетом сероводородной коррозии, которая возрастает при повышении температуры, то есть оптимальный уровень температуры – это 500 °С.

Тумановский А.Г.: Понятно. А что происходит с соединениями азота при этих температурах?

Строков А.А.: Именно в установке сероочистки?

Тумановский А.Г.: Да. Вы на них не влияете? Не окисляете?

Строков А.А.: Проводились исследования с рудой Порожинского месторождения, которая сильно влияет на состав газа, и мы получали снижение концентрации аммиака при его разложении.

Тумановский А.Г.: Каталитически?

Строков А.А.: Да, за счет каталитических свойств руды, которые мы исследовали. Но в работу эти данные не вошли.

Тумановский А.Г.: Есть еще вопросы? Нет вопросов. Спасибо. Далее слово предоставляется научному руководителю диссертанта – Андрею Николаевичу Епихину.

Епихин А.Н.: Для начала я хочу сказать несколько слов о работе и о самом аспиранте, ее выполнившим. То есть кое-что добавить. Тут, может быть, у кого-то возник вопрос, а почему именно железно-марганцевые руды исследуются? Когда мы приступали к работе, мы, прежде всего, смотрели на то, чтобы, во-первых, это было дешево, во-вторых, чтобы выполнялись все те требования, которые аспирант озвучил (чтобы руды были сероёмкие и так далее).

Но почему железно-марганцевые? Еще и потому, чтобы фактически использовать эти руды как продукцию двойного назначения. То есть фактически руда выполняет свои функции и как поглотитель серы, обрабатывается, а потом поступает по своему прямому назначению на металлургический завод. Мне, как руководителю, такой подход казался наиболее приемлемым при выборе высокотемпературного сорбента. То, что железо и марганец работают, это аспирант уже отметил. Надо сказать, что мы удачно поработали, нашли подходящий материал. Да, он не очень активный, есть руды и получше, но по другим показателям они не подходят. Я считаю, что этот вариант нам подойдет, тем более, если впереди нас ожидает еще много работы. Но в любом случае продукция двойного назначения всегда будет более перспективна, более необходима, чем продукция, которая используется один раз. Это по работе.

Что касается самого аспиранта, я должен отметить, что он проявил не просто желание работать в этой области, не просто он проводил испытания, а он сам предлагал определенные подходы. Что-то оказалось, допустим, неподходящим, что-то мы с ним отвергли, а некоторые позиции, те которые он предлагал, мы проверили, и, знаете, получается.

Кроме того, в диссертации это не отмечено, потому что Андрей делал диссертацию по сероочистке, но мы провели работы и по применению этих руд в ряде других областей и получили неплохие результаты, хотя они в диссертации и не приводятся. Мы занимались использованием ряда руд, чтобы каталитически разлагать аммиак в этом же газе, а также для получения наноуглерода. Некоторыми из работ по наноуглероду Андрей руководил сам, лично, без меня.

К чему я делаю такое отступление от ПГУ и от сероочистки? Чтобы показать, что человек способен самостоятельно ставить цели, задачи и выполнять их на самом профессиональном уровне. И я считаю, как руководитель, что звания кандидата технических наук он заслуживает.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Есть вопросы к научному руководителю? Нет вопросов. Диссертационная работа выполнена в лаборатории очистки газов от оксидов серы отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций

ОАО «ВТИ». Заключение «ВТИ» представит заведующая отделением Брагина Ольга Назаровна.

Брагина О.Н.: Я хочу еще раз подчеркнуть, что Андрей Александрович, придя к нам в 2007 году, практически сразу занялся научными исследованиями и попал в такую лабораторию, где практикуется как раз экспериментальные исследования. И это дало возможность ему поступить в аспирантуру и выполнить ту работу, о которой говорилось здесь. Я полностью поддерживаю слова его руководителя Андрея Николаевича Епихина и хочу сказать, что 21 мая мы провели НТС по диссертации Строкова, а 10 июня у нас началась крупная и очень интенсивная работа по базовому проекту установки сероочистки. И надо сказать, что очень много в ней было возложено и на Андрея Александровича, мы на него рассчитывали. Я хочу этим сказать, что он занимался не только этой работой, и подчеркнуть его достоинства и широкий подход.

Хочу еще раз подчеркнуть, что было выполнено комплексное экспериментальное исследование процесса высокотемпературной сероочистки генераторного газа с помощью железомарганцевых руд России. И это комплексное исследование было проведено впервые.

НТС нашего отделения отмечает, что работа Строкова выполнена на высоком профессиональном уровне и имеет существенное значение для совершенствования и разработки парогазовых установок с газификацией угля.

Содержание её соответствует специальности 05.14.14. – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». Строков Андрей Александрович является квалифицированным специалистом, способным решать сложные технические задачи в теплоэнергетике.

Учитывая важную роль соискателя на всех этапах выполненной работы, научную новизну, практическую значимость полученных результатов, достоверность и обоснованность сделанных выводов, апробацию результатов работы, полноту литературного освещения материалов диссертации, расширенный НТС отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций ОАО «ВТИ» констатирует соответствие диссертационной работы

А.А. Строкова требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

На основании изложенного расширенный НТС отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций ОАО «ВТИ» принял следующее решение:

Диссертация «Исследование процесса очистки генераторного газа от сероводорода с помощью минеральных железомарганцевых хемосорбентов» Строкова Андрея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Заключение принято на расширенном заседании научно-технического совета отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций ОАО «ВТИ».

Присутствовало на заседании: 21 человек. Результаты голосования: «за» – 21 человек, «против» - 0 человек, «воздержалось» - 0 человек, протокол № 3 от «21» мая 2015 года.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Есть вопросы? Вопросов нет. Переходим к отзывам. Начнем с отзыва ведущей организации. Поскольку на нашем заседании отсутствуют представители ведущей организации, слово предоставляется Павлу Андреевичу Березинцу.

Березинец П.А.: Придется набраться терпения, потому что отзыв зачитывается полностью, от первой строки до последней.

Отзыв ведущей организации "Национальный исследовательский университет "МЭИ" на диссертационную работу Строкова Андрея Александровича «Исследование очистки от сероводорода с помощью минеральных хемосорбентов генераторного газа, сжигаемого в энергетических парогазовых установках с газификацией углей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

Представленная на отзыв диссертация изложена на 174 страницах, содержит введение, 7 глав, заключение, список сокращений и условных обозначений,

список использованной литературы (85 отечественных и зарубежных источников). Также представлен автореферат на 27 страницах.

### **Актуальность для науки и практики**

Переработка угля с целью получения тепловой и электрической энергии методом газификации является перспективным направлением для энергетики России. Внедрение энергетических парогазовых установок с газификацией угля сдерживается их высокой удельной стоимостью и сложностью аппаратного исполнения, обусловленной не в последнюю очередь необходимостью использования сложного оборудования для очистки генераторного газа от соединений серы. Поэтому важной задачей является разработка простого, надежного и эффективного способа высокотемпературной сероочистки газов газификации углей, на что и направлена работа диссертанта. В этой связи диссертационная работа Строкова А.А. по исследованию процесса высокотемпературной сероочистки генераторных газов с применением доступных железомарганцевых руд месторождений России является весьма актуальной.

Комплексные экспериментальные исследования по выбору минерального железомарганцевого хемосорбента для высокотемпературной сероочистки газов, получаемых газификацией твердого топлива, проводились впервые.

### **Основные научные результаты и их значимость для науки**

Полученные результаты и выводы, сформулированные в диссертационной работе, являются новыми и значимыми для науки и создают научный задел для разработки систем высокотемпературной сероочистки генераторного газа в составе парогазовых установках с газификацией угля.

Основное достоинство работы заключается в проведении широкого комплекса экспериментальных исследований с определением химического и минералогического состава руд, их физико-механических характеристик, изучением побочных реакций компонентов руд с топливными компонентами ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) генераторного газа, определением хемосорбционной ёмкости руд к сероводороду на модельных газовых смесях и на реальном генераторном газе, в режиме неподвижного и кипящего слоя хемосорбента.

На основе полученных результатов выбран оптимальный минеральный хемосорбент сероводорода, разработаны технические решения по его применению для сероочистки генераторного газа в энергетике (в парогазовых установках с газификацией угля малой и большой мощности, в твердооксидных топливных элементах, работающих на газе газификации твердого топлива), а также на химических предприятиях по синтезу химических веществ (жидких моторных топлив, метанола и др.), использующих в качестве сырья синтетический газ, получаемый газификацией углей.

Проведенная с учетом полученных экспериментальных данных технико-экономическая оценка позволила научно обосновать экономические преимущества применения метода высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием руды Аскизского месторождения на примере парогазовой установки с газификацией кузнецкого угля мощностью 470 МВт.

#### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при разработке в России парогазовых установок с газификацией угля с системой высокотемпературной сероочистки генераторного газа с помощью дешевых и доступных природных хемосорбентов. При этом применение такого метода сероочистки генераторного газа вместо традиционной абсорбционной очистки упростит установку и снизит её удельную стоимость, а также повысит её КПД, поскольку позволит производить очистку при температуре 500-600°C, благодаря чему снизятся термодинамические потери тепла генераторного газа и потери водяного пара.

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в работе данные и разработанные технические решения могут быть использованы при проектировании систем высокотемпературной сероочистки генераторного газа для:

- ПГУ с внутрицикловой газификацией угля малой и большой мощности,
- ТОТЭ, использующих для выработки энергии продукты газификации угля,

- различных промышленных предприятий, синтезирующих химические вещества с использованием  $H_2$ ,  $CO$  и  $CH_4$ , содержащихся в продуктах газификации угля.

### **Оценка содержания диссертации, замечания по оформлению диссертации и автореферата**

В целом содержание и оформление диссертации и автореферата соответствуют существующим требованиям. Основные результаты работы в полной мере отражены в публикациях автора и автореферате. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

В качестве замечания следует отметить слишком большой объем автореферата (27 страниц) и представление удельных затратных вложений в иностранной валюте (долларах США).

**Общие замечания:** В работе не приводятся расчеты кинетики процесса хемосорбции сероводорода минеральными рудами, не оценено минимальное время, за которое происходит реакция оксидов металлов с сероводородом.

1. Недостаточно подробно изложены методики экспериментальных исследований и не проведена оценка погрешностей измеренных опытных параметров.

2. В стендовых экспериментах на реальном генераторном газе не определена динамическая ёмкость минеральных хемосорбентов по сероводороду. По результатам не вполне ясно насколько долго может работать реактор сероочистки без перезагрузки хемосорбента. Кроме того не проработан вопрос переработки и утилизации хемосорбента, выработавшего свой ресурс.

3. В работе следовало бы больше внимания уделить технико-экономическим характеристикам предложенной технологии очистки с целью обоснования ее экономических преимуществ.

**Заключение:** Диссертация Строкова А. А. «Исследование очистки от сероводорода с помощью минеральных хемосорбентов генераторного газа, сжигаемого в энергетических парогазовых установках с газификацией углей» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной при

непосредственном участии автора на современном научно-техническом уровне, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественной энергетики.

Результаты диссертационной работы представляют научную ценность для обоснования процессов высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием железомарганцевых руд, а рассмотренные технические решения имеют практическую значимость.

Представленная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Строков Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании отдела «Парогенераторостроение» кафедры паровых и газовых турбин (протокол №6 от 8 декабря 2015 года).

Заведующий отделом ПГС кафедры паровых и газовых турбин НИУ "МЭИ", заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор Росляков Павел Васильевич.

Ученый секретарь отдела ПГС кафедры паровых и газовых турбин НИУ "МЭИ", Ионкин Игорь Львович, кандидат технических наук, доцент.

Отзыв утвержден проректором научно-исследовательского университета «МЭИ» по научной работе Драгуновым 5-го декабря 2015 года.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Андрей Александрович, пожалуйста, ответьте на замечания ведущей организации. Не надо их повторять, потому что у всех они есть. Только смысл и ответ.

Строков А.А.:

1. Замечание о том, что в работе не приводится расчета кинетики процесса.
  - В задачи работы не входил расчет кинетики процесса хемосорбции сероводорода, что само по себе является отдельной задачей, которой может быть посвящена отдельная работа.

2. Недостаточно полно приведены методики и не определена погрешность.

- Оценка погрешностей в работе действительно не приводится, однако погрешности экспериментов не мешали сделать основные выводы, основываясь на несомненных закономерностях полученных результатов. Так, например, в стендовых экспериментах с реальным генераторным газом погрешность химического йодометрического метода определения концентрации сероводорода в газе не превышала 20% относительных; при исследовании побочных химических реакций руд с топливными компонентами погрешность определения концентраций не превышала 15% относительных.

3. В стендовых экспериментах не определена динамическая ёмкость хемосорбентов.

- Это я уже отмечал в своем докладе. Устройство загрузки твердого топлива на стендовой установке по газификации нефтяного кокса не позволяло, к сожалению, проводить испытания в течение длительного времени, устойчивая работа была в течение не более двух часов, поэтому не удалось получить данные по динамической сероемкости.

4. Не проработан вопрос переработки и утилизации хемосорбента.

- В работе освещены данные Всероссийского института минерального сырья по окислительной регенерации сульфидированной руды и рекомендуется утилизация отработанной руды на металлургических предприятиях.

5. В работе следовало больше внимания уделить технико-экономическим характеристикам.

- Основной задачей работы было исследование и научное обоснование применимости железомарганцевой руды для сероочистки генераторных газов, сжигаемых в парогазовых установках с газификацией. Для мощной ПГУ 470 МВт была проведена сравнительная оценка предлагаемого метода и традиционной абсорбционной очистки.

Это все замечания ведущей организации.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Мы получили отзывы на диссертационную работу от восьми организаций. Есть необходимость посоветоваться, будем ли мы

зачитывать отзывы полностью? Не будем. Тогда Павел Андреевич зачитает, от кого получен отзыв и кем подписан, а уже сами замечания диссертант будет декларировать и на них отвечать. Годится? Принята такая схема.

Березинец П.А.: На замечания ведущей организации он уже ответил. Есть замечания официальных оппонентов. Их зачитают сами оппоненты. Отзывы на автореферат получены из:

- *Ивановского государственного энергетического университета имени Ленина*, подписанный заместителем заведующего кафедрой «Тепловые электрические станции» доцентом Ледуховским и секретарем ученого совета Ивановского энергетического университета Ширяевой.

- *Ивановского государственного химико-технологического университета*, подписанный заведующим кафедрой промышленной экологии кандидатом химических наук, доцентом Гуциным и ученым секретарем Ученого совета, доцентом Гординой.

- *Энергетического института имени Кржижановского («ЭНИИ»)*, подписанный заведующим лабораторией «Энергоэффективность и экология в энергетике» Сапаровым и ученым секретарем, доктором технических наук Корценштейном.

- *Российского государственного университета нефти и газа имени Губкина*, подписанный заведующим лабораторией защиты воздушного бассейна доктором технических наук, профессором Кулиш.

- *Семибратовской фирмы «Научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов»*, ярославская область, поселок Семибратово, подписанный генеральным директором Курицыным.

- *Общества с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)*, Московская область, поселок Развилка, подписанный начальником лаборатории газовой серы, кандидатом технических наук Мотиным и ведущим научным сотрудником, кандидатом технических наук Шкляр.

- *Открытого акционерного общества «Институт Теплоэлектропроект»*, подписанный заместителем главного инженера – начальником технического отдела, кандидатом технических наук Шабановым и заместителем генерального директора по управлению Киселевым.

- *Ассоциации газотурбинных технологий для энергетики и промышленности*, город Москва, подписанный исполнительным директором, кандидатом технических наук Гончаровым.

Тумановский А.Г.: Спасибо, Павел Андреевич. Андрей Александрович, пожалуйста, вопросы и ответы.

Строков А.А.: Надо заметить, что некоторые вопросы и замечания повторяются, поэтому я не буду зачитывать их полностью.

1. Замечание о том, что в автореферате отсутствуют заявленные автором принципиальные технологические схемы установок высокотемпературной сероочистки.

- Эти схемы представлены в самой диссертации, в автореферате их действительно нет. Объем автореферата получился и без того большим.

2. При проведении технико-экономической оценки преимуществ разработанного метода высокотемпературной сероочистки не учтены затраты на хранение, а также необходимость утилизации хемосорбента, выработавшего свой ресурс.

Тумановский А.Г.: Чье это замечание?

Николайкина Н.Е.: Официального оппонента.

Тумановский А.Г.: Это позже.

Строков А.А.:

3. В автореферате не приведена оценка габаритных размеров основного оборудования сероочистки генераторного газа. Какой диаметр реактора необходим для сероочистки генераторного газа для мощной ПГУ? Это замечание ЭНИН.

- Эти параметры указаны в самой диссертации. Габариты реактора сероочистки кипящего слоя для ПГУ с газификацией мощностью 470 МВт: расчетный диаметр составляет 3 м, высота 7,5 м.

4. В автореферате не приводятся данные по способам утилизации отработанного хемосорбента.

- Данные по утилизации приводятся в диссертации.

5. Замечания «Газпром ВНИИГАЗ». Не приведен ожидаемый химический состав генераторного газа, а также производительность и режим работы газоочистной установки, рекомендуемой к промышленному использованию.

- Если понимать этот вопрос в том смысле, какой состав генераторного газа ожидается после сероочистки, то по результатам исследований оптимальный хемосорбент не поддерживает никаких побочных химических реакций, а происходит лишь хемосорбция сероводорода с получением водяного пара, что несущественно влияет на химический состав газа. А если понимать этот вопрос так: какой ожидаемый химический состав генераторного газа, который вообще можно очищать, то максимальное содержание сероводорода 0,5 % объемных (это то, что мы исследовали на стендовой установке газификации нефтяного кокса), а топливные компоненты могут варьироваться в широких диапазонах, так как не происходит побочных реакций.

6. В технико-экономической оценке не обоснована утилизация продукта низкотемпературной очистки в виде элементарной серы, высокотемпературной очистки в виде пиросульфита натрия.

- Если имеется в виду, почему выбиралось получение именно элементарной серы для низкотемпературной абсорбционной сероочистки, то потому что это стандартный и наиболее широко используемый метод Клауса, а получение пиросульфита натрия в виде побочного продукта обусловлено тем, что это наиболее простой способ в плане аппаратного оформления и цена на получаемый побочный продукт (пиросульфит натрия) значительно превосходит цену на сырье (на соду), поэтому мы выбрали именно этот вариант.

7. По результатам экспериментальных исследований в качестве оптимального природного хемосорбента выбрана железомарганцевая руда Аскизского месторождения. На сколько хватит запасов этого месторождения при использовании руды для сероочистки генераторных газов на мощных ПГУ с газификацией? Это замечание и вопрос «Института Теплоэлектропроект».

- По нашим расчетам при запасах месторождения руды 19 миллионов тонн этой и при суммарной мощности всех ПГУ с газификацией 5,4 ГВт этой руды хватит на 125 лет. Эти расчетные данные приводятся в диссертации.

8. Замечание ассоциации газотурбинных технологий. В качестве показателя прочности железомарганцевых руд приводится их микротвердость [кгс/мм<sup>2</sup>], вследствие чего сложно сравнить их по этому показателю с существующими синтетическими поглотителями, показателем прочности которых является индекс прочности на раскалывание [кг/мм].

- Это действительно так вследствие разных методов определения прочности, поэтому сравнить сложно. Однако результаты определения прочности руды Аскизского месторождения, проведенные во Всероссийском институте минерального сырья свидетельствуют о том, что руда имеет очень высокую прочность.

Остальные замечания повторяются.

Тумановский А.Г.: Или вы с ними согласны.

Строков А.А.: Да.

Тумановский А.Г.: Не возникли ли у членов диссертационного совета новых вопросов в связи с ответами диссертанта? Не возникли. Спасибо.

Переходим к выступлению официальных оппонентов.

Шпирт М.Я.: В отзыве ведущей организации был уже охарактеризован объем и направление исследований, выполненных в диссертации, поэтому для того, чтобы не занимать внимания членов ученого совета, я опущу этот раздел отзыва. Перейду к актуальности исследований. За рубежом осуществлен ряд проектов по получению генераторного газа для целей энергетического использования. У нас в стране такие работы не вышли пока за стадию опытных или опытно-

промышленных работ, но они несомненно являются актуальными для будущего энергетики России. Однако внедрению подобных методов получения энергетических газов в значительной степени препятствует сложность методов очистки газов от сероводорода, который является неизменным компонентом генераторного газа, получаемого при газификации твердого или жидкого топлива. Поэтому данная работа, в которой предложен относительно новый метод снижения содержания сероводорода в генераторном газе, полученном методом газификации, безусловно, является актуальной для энергетики России. Научная новизна работы обусловлена тем, что полученные результаты экспериментального исследования по выбору железомарганцевых руд оптимального состава в качестве минерального сорбента для высокотемпературной сероочистки генераторных газов характеризуются несомненной новизной. Выводы, сформулированные в диссертационной работе, значимы для научного обоснования предложенной диссертантом новой технологии сероочистки генераторных газов и создают научный задел для разработки систем высокотемпературной их очистки от сероводорода в составе парогазовых установок, основанных на газификации углей и жидкого топлива.

К достоинствам следует отнести широкий комплекс лабораторных и стендовых экспериментальных исследований, включающих определение химического и минералогического состава изученных руд, их физико-механических характеристик, а также определение впервые сорбционной ёмкости по отношению к сероводороду железомарганцевых руд различных месторождений, которые были получены как на модельных газовых смесях, так и на реальном генераторном газе. Несомненным достоинством работы является исследование также реакций изученных диссертантом руд с основными компонентами генераторных газов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ), определяющих его теплоту сгорания и ценность в качестве сырья производства водорода или для энергетики.

Проведенные исследования позволили опытным путем выбрать оптимальный минеральный сорбент сероводорода и разработать технические решения по его применению для сероочистки генераторного газа, который, в частности, может

применяться как топливо (в парогазовых установках с газификацией угля малой и большой мощности, а также в твердооксидных топливных элементах, работающих на газе, получаемого газификацией угля и других видов твердого топлива), и на химических предприятиях по синтезу химических веществ из синтез-газа, производимого газификацией угля.

Проведенная на примере парогазовой установки с газификацией угля мощностью 470 МВт на основе полученных экспериментальных данных технико-экономическая оценка позволила дать научное обоснование преимуществ применения метода предложенной в диссертации высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием как сорбента руды Аскизского месторождения по сравнению с традиционным промышленным методом абсорбционной сероочистки при температурах ниже 40 °С.

Обоснованность и достоверность результатов работы.

Обоснованность полученных результатов обеспечена многочисленными лабораторными и стендовыми экспериментами, а также выводами описанной выше технико-экономической оценки. Достоверность основана на использовании утвержденных методик испытаний и применении современной аттестованной измерительной аппаратуры и средств обработки экспериментальных данных.

Практическая ценность.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке в России парогазовых установок с газификацией угля с системой высокотемпературной сероочистки генераторного газа с помощью доступных природных минеральных сорбентов, характеризующихся относительно низкой стоимостью. При этом применение такого метода сероочистки генераторного газа вместо традиционной абсорбционной очистки упростит аппаратное оформление установки сероочистки по сравнению с предлагаемыми в настоящее время для промышленного использования абсорбционных методов. Одновременно снизятся удельные капитальные затраты на создание отделения сероочистки, а также повысится суммарный КПД применения генераторного газа, поскольку позволит производить его очистку при более высоких температурах (500-600°С).

Разработанные технические решения могут быть использованы при проектировании систем высокотемпературной сероочистки генераторного газа для следующих процессов:

- ПГУ с внутрицикловой газификацией угля на установках малой и большой мощности;
- твердооксидных топливных элементов, использующих для выработки энергии продукты газификации угля,
- различных промышленных предприятий, синтезирующих химические вещества на основе  $H_2$ , CO и  $CH_4$ , содержащихся в генераторном газе.

Оценка содержания диссертации в целом.

Содержание автореферата полностью отражает основные положения и выводы диссертации. В целом содержание и оформление диссертации и автореферата соответствуют существующим требованиям, хотя следует отметить повышенный объем автореферата (27 страниц). Основные результаты, полученные диссертантом полностью суммированы в его публикациях.

Общие замечания.

1. Взаимодействие железо- или марганцевосодержащих компонентов руд с сероводородом диссертант обозначает термином «хемосорбция». Из общих соображений можно согласиться с подобным обозначением, но Строков не приводит его подтверждения, одним из которых могли бы быть результаты термодинамического анализа.

2. В диссертации проведен расчет термодинамических равновесий для отдельных реакций, которые не позволяют делать выводы о количественном составе продуктов, образующихся после улавливания соединений серы изученными Mn-Fe рудами. Однако к настоящему времени разработаны методики химической термодинамики, позволяющие рассмотреть протекание этих реакций в целом, суммарно, и которые позволяют рассчитать количества всех образующихся веществ в условиях термодинамического равновесия при заданных величинах давления и количествах исходных компонентов, число которых может составлять до 20. Выполнение подобных расчетов позволило бы диссертанту

более ясно представить взаимодействия, имеющие место, например, между компонентами исходного генераторного газа, в том числе соединений серы и соединениями железа и марганца исходных руд,

3. В диссертации не показан фазовый состав изученных руд после их взаимодействия с соединениями серы, который позволяет разработать методы их регенерации или утилизации. Подобная информация могла бы быть получена также с использованием одной из указанных выше программ химической термодинамики и дополнена экспериментальными данными рентгенофазового изучения. Так, в частности, надо указать, что при взаимодействии марганцевых руд с серосодержащими компонентами могут быть получены такие соединения как сульфат марганца, который повысит ценность этих материалов как сырья для металлургии.

4. Диссертанту следовало провести оценку погрешностей измеренных опытных параметров, что позволило бы более обосновано судить о возможностях разработанного способа улавливания соединений серы.

5. По нашему мнению неудачно выбран для стендовых испытаний реальный генераторный газ, как результат газификации нефтяного кокса. Более представителен для решаемой в диссертации задачи генераторный газ, получаемый в результате газификации углей.

Заключение.

Высказанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация Строкова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной при непосредственном участии автора на современном научно-техническом уровне, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественной энергетики.

Результаты диссертационной работы, несомненно, представляют научную ценность для обоснования процессов высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием железомарганцевых руд, а рассмотренные технические решения имеют практическую значимость.

Представленная работа удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Строков Андрей Александрович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». Спасибо.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Андрей Александрович, пожалуйста, ответьте на вопросы.

Строков А.А.: Замечание по поводу подтверждения химического механизма сорбции.

- Химическая природа поглощения сероводорода железомарганцевыми рудами подтверждается результатами фазового анализа исходных и отработанных руд (таблица 18 в диссертации), которые свидетельствуют о переходе оксидов этих металлов в результате поглощения сероводорода в соответствующие сульфиды.

2. Замечание по поводу программного расчета термодинамических равновесий.

- Действительно, программный расчет термодинамических равновесий с помощью современных программ в работе не проводился, и было бы интересно получить подобные результаты, но целью работы было именно экспериментальное исследование процесса хемосорбции, дающее объективные результаты, учитывающие все нюансы химических и физических свойств руд (многокомпонентный состав руд, в том числе различные исходные фазы в рудах, переменную валентность металлов, удельную поверхность), тогда как моделирование процесса не всегда позволяет учесть все эти критерии.

3. Замечание о том, что не показан фазовый состав руд после взаимодействия с соединениями серы.

- Фазовый состав руд после их взаимодействия с сероводородом представлен в диссертации в таблице 18.

4. На замечание по поводу погрешностей я уже отвечал, согласен с замечанием.

5. Замечание по поводу неудачно выбранного реального генераторного газа.

- Действительно, более удачным вариантом были бы испытания по сероочистке газа газификации угля, однако эксперименты проводились в комплексной работе по исследованию горновой газификации топлива (являлись их частью). К тому же высокое содержание серы в нефтяном коксе позволило испытать природные хемосорбенты на высокосернистом генераторном газе, что было положительным моментом. Это все замечания.

Тумановский А.Г.: Михаил Яковлевич, у вас есть еще замечания?

Шпирт М.Я.: Я в целом согласен с разъяснениями диссертанта. Единственное, что бы я хотел заметить, что программа химической термодинамики учитывает все возражения, которые дал диссертант. Единственное, что не соответствует практике в термодинамической программе это то, что она соответствует равновесным условиям, а в реальности термодинамические условия равновесия могут быть не достигнуты.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Второй оппонент – Наталья Евгеньевна Николайкина.

Николайкина Н.Е.: Начну с актуальности темы. Содержание диссертационной работы Строкова А.А. посвящено решению проблемы создания экологически безопасной высокотемпературной подготовки топлива для систем производства тепла и электроэнергии с помощью природных рудных материалов методом хемосорбции.

Известно, что теплоэнергетика является одним из основных источников антропогенного загрязнения атмосферы. При этом наиболее массовыми загрязнителями воздушного бассейна являются оксиды серы, азота, окись углерода, пыль, углеводороды. Соединения серы не только вызывают коррозию оборудования, но и при поступлении в атмосферу оксиды серы являются одним из основных загрязнителей, приводящих к образованию кислых дождей. Широко применяемые абсорбционные методы очистки значительных объемов дымовых газов имеют целый ряд недостатков, в том числе они сложны в аппаратном оформлении, работают при низких температурах газов, поступающих на очистку. В настоящее время в России не эксплуатируются промышленные парогазовые

установки с внутрицикловой газификацией угля, обладающие более высоким по сравнению с традиционными теплоэлектростанциями значениями КПД.

Для успешного освоения и внедрения в России таких установок необходимо повысить их конкурентоспособность за счет снижения удельной стоимости, которая в настоящее время высока, в том числе из-за необходимости установки оборудования для очистки генераторного газа от соединений серы.

В этой связи диссертационная работа Строкова Андрея Александровича, направленная на совершенствование технологии высокотемпературной сероочистки генераторных газов с помощью доступных железомарганцевых руд месторождений России, является актуальной.

Основные положения работы были уже освещены. Я также отмечаю, что диссертация содержит 174 страницы машинописного текста, состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы, включающего 85 отечественных и зарубежных источников.

Далее я рассматриваю содержание по главам, но оно приведено в автореферате и отмечено в отзыве ведущей организации. Это всё соответствует диссертации. Поэтому позвольте мне остановиться на научной новизне, которая, по моему мнению, и как это показано в работе диссертанта, состоит в следующем.

Впервые проведены экспериментальные исследования физико-химических свойств и минералогического состава железомарганцевых руд отечественных месторождений с целью обоснования возможности их применения для процессов сероочистки топлива в качестве хемосорбента.

Впервые проведено изучение побочных реакций компонентов руд с топливными компонентами генераторного газа, определена хемосорбционная ёмкость руд к сероводороду на модельных газовых смесях и на реальном генераторном газе в режиме неподвижного и кипящего слоя хемосорбента.

Разработаны и обоснованы технологии применения для сероочистки генераторного газа в энергетике минерального хемосорбента на основе руды отечественных месторождений.

На основе полученных экспериментальных данных проведена научно обоснованная технико-экономическая оценка преимуществ разработанного метода высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием руды Аскизского месторождения.

Обоснованность и достоверность результатов работы.

Обоснованность полученных результатов обеспечена многочисленными лабораторными и стендовыми экспериментами, достоверность основана на использовании утвержденных методик испытаний и применении современной аттестованной измерительной аппаратуры и средств обработки данных.

Практическая ценность полученных результатов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке в России парогазовых установок с газификацией угля с системой высокотемпературной сероочистки генераторного газа с помощью дешевых и доступных природных сорбентов, что позволит упростить установку, снизить её удельную стоимость и повысит КПД.

Разработанные технические решения могут быть использованы при проектировании систем высокотемпературной сероочистки генераторного газа.

Личный вклад автора.

Основные результаты работы являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии, что подтверждено, в том числе, публикациями.

Оценка содержания диссертации, замечания по оформлению диссертации и автореферата.

В целом содержание и оформление диссертации и автореферата соответствуют существующим требованиям. Основные результаты работы в полной мере отражены в публикациях и в автореферате. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Здесь в качестве замечания, это уже звучало и отмечено у меня, что очень большой объем автореферата (27 страниц против 16-ти, которые обычно бывают у соискателей степени кандидата).

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности.

Работа соответствует заявленной специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», что подтверждается соответствием содержания работы требованиям паспорта специальности 05.14.14, в том числе в области исследований по пункту 3 «разработка, исследование, совершенствование способов снижения влияния работы тепловых станций на окружающую среду». В формуле специальности отмечается, что объектами исследования по данной специальности могут быть: «исследования по существенным особенностям технических и физико-химических процессов, характерных для систем, установок, и агрегатов, связанных единым циклом производства тепла и электроэнергии, систем подготовки и сжигания топлива». То есть, соответствует паспорту специальности.

Замечания по работе.

1. Уже звучавшее здесь, есть и у меня: в работе не приводится оценка погрешности полученных экспериментальных данных.
2. В работе не приведены расчеты кинетики процесса хемосорбции сероводорода минеральными рудами и не оценено минимальное время, за которое происходит реакция оксидов металлов с сероводородом.
3. На стендовых экспериментах на реальном генераторном газе не определена динамическая ёмкость минеральных хемосорбентов по сероводороду. Кстати, при расчете оборудования непонятно какое время пребывания генераторного газа следует рекомендовать для принятия при расчете адсорбера, например.
4. При проведении технико-экономической оценки преимуществ разработанного метода высокотемпературной сероочистки не учтены затраты на хранение, а также не учтены затраты на необходимость утилизации хемосорбента, выработавшего свой ресурс.

Отмеченные недостатки незначительно снижают ценность проведенных диссертантом исследований, не затрагивают достоверности и значимости основных положений и результатов его диссертационной работы.

**Заключение.** Диссертация Строкова Андрея Александровича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной лично автором, либо при его непосредственном участии на современном научно-техническом уровне, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественной энергетики.

Результаты диссертационной работы представляют научную ценность для обоснования процессов высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием железомарганцевых руд, а предложенные технические решения имеют практическую значимость.

Представленная работа удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Строков Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». Спасибо.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Андрей Александрович, пожалуйста, ответы на замечания.

Строков А.А.: Замечание про погрешности уже было, я согласен с этим замечанием.

1. На замечание о том, что не представлены расчеты кинетики процесса химического взаимодействия я могу добавить, что работа была направлена именно на экспериментальное исследование процесса и подтверждение возможности использования природных хемосорбентов, а теоретическому расчету кинетики процесса, наверное, может быть посвящена отдельная диссертационная работа.

2. Не определена динамическая емкость при очистке реального генераторного газа.

- Это действительно так. Это замечание уже звучало. Такие данные не позволило получить нам аппаратное оформление установки.

4. Замечание про время пребывания генераторного газа, которое рекомендуется в адсорбере.

- Мы оперируем не временем пребывания в генераторного газа в адсорбере, а объемной скоростью газа. Объемная скорость газа – это отношение объемного расхода газа ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) к объему хемосорбента ( $\text{м}^3$ ). Рекомендованное значение этого параметра  $900-1500 \text{ ч}^{-1}$ .

5. При проведении технико-экономической оценки преимуществ разработанного метода высокотемпературной сероочистки не учтены затраты на хранение, а также необходимость утилизации хемосорбента, выработавшего свой ресурс.

- Затраты на хранение мы не считали по причине того, что сделать это сложно и вклад этих затрат в общие затраты незначителен. А про утилизацию можно сказать, что при использовании отработанного хемосорбента, содержащего марганец, в качестве сырья на металлургических предприятиях возможно получении прибыли. Но мы этого не учитывали, потому что сложно оценить стоимость этого сырья.

Тумановский А.Г.: Наталья Евгеньевна, вы удовлетворены ответами?

Николайкина Н.Е.: Да, вполне.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Теперь дискуссия, обсуждение. Пожалуйста, кто хочет выступить?

Шварц. А.Л.: Примерно почти полтора года назад я был включен в комиссию совета для просмотра диссертации Андрея Александровича. И поскольку у меня были трудности передвижения из-за сломанной ноги, я имел возможность подробнейшим образом прочитать всю диссертационную работу. Она на меня произвела очень хорошее впечатление. Я просмотрел и автореферат. Действительно, реферат во многом повторяет диссертационные положения и

очень уж обширен. В первом варианте диссертации практически отсутствовали выводы, там было просто написано в конце в заключении, что для того, чтобы оценить то-то, смотри главу такую-то, для того, чтобы оценить то-то, смотри главу такую-то... Это было единственное негативное впечатление от прочтения. Все это сейчас, безусловно, исправлено, выводы очень четко изложены. У меня очень положительное впечатление от этой работы, а все положительные стороны и замечания отражены в ходе нынешнего заседания совета. Я полностью поддерживаю кандидатуру диссертанта для присвоения ему ученой степени кандидат технических наук.

Тумановский А.Г.: Спасибо. Кто еще хотел бы выступить?

Ольховский Г.Г.: Мне трудно говорить о химической стороне работы, но мне совершенно ясно, что это очень важный вклад в развитие парогазовых установок. Дело в том, что необходимость охлаждения газа для очистки, а потом его подогрева сильно усложняет схему, дорого стоит и затрудняет эксплуатацию. Известно, что за границей в течение длительного времени ведутся серьезные работы по сероочистке при примерно таких же температурах. Это температуры, которые обеспечивают транспортировку газа в трубах из нормальной стали. Лет 20 ведутся. И там используются искусственные сорбенты – цинкоферриты, которые очень дороги. Поэтому, конечно, такая работа очень актуальна. Сделана она хорошо, это очевидно всем здесь присутствующим, и тут чувствуется стиль и самого диссертанта, и его руководителя. Они сделали все это достойно и аккуратно. Хорошая и важная работа! Спасибо!

Тумановский А.Г.: Спасибо. Есть еще желающие выступить? Нет желающих. Тогда заключительное слово.

Строков А.А.: В заключение я бы хотел сказать спасибо членам диссертационного совета, оппонентам, согласившимся мне оппонировать, ведущей организации, всем кто помогал мне по ходу этой работы. Ну и отдельное спасибо, конечно, моему научному руководителю Епихину Андрею Николаевичу за его неоценимую помощь в работе. Спасибо большое всем собравшимся!

Тумановский А.Г.: Спасибо. Для того чтобы приступить к тайному голосованию, нам нужно избрать счетную комиссию. У меня такое предложение: Березинец Павел Андреевич, Агабабов Владимир Сергеевич, Гладштейн Владимир Исаакович. Я думаю, что комиссия может приступить к своей работе, а члены совета проголосовать. Нет возражений? - Нет

**(объявляется перерыв для голосования)**

Далее председатель счетной комиссии зачитывает протокол счетной комиссии.

Гладштейн В.И., председатель счетной комиссии:

Я зачитаю протокол заседания счетной комиссии диссертационного совета от 21 января 2016 года. Комиссия избрана для подсчета голосов при тайном голосовании по вопросу о присуждении Строкову Андрею Александровичу ученой степени кандидата технических наук. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 21 человека. Присутствовали на заседании 16 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 9, роздано бюллетеней – 16. Осталось не роздано бюллетеней – 5, в урне бюллетеней – 16. Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата технических наук Строкову Андрею Александровичу: за – 16, против – нет, недействительных – нет. Председатель комиссии – Гладштейн В.И., члены комиссии – Агабабов В.С. и Березинец П.А..

Тумановский А.Г.: Утверждаем протокол счетной комиссии. Кто за? Воздержался, против - нет? Ну, тогда мы можем поздравить Андрея Александровича с успешной защитой.

Строков А.А.: Спасибо большое!

Тумановский А.Г.: Нам надо обсудить проект заключения, у всех членов диссертационного совета оно имеется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 222.001.01 НА БАЗЕ ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «ВСЕРОССИЙСКИЙ ДВАЖДЫ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ» (ОАО «ВТИ») ПО

# ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21 января 2016 года протокол № 7

о присуждении Строкову Андрею Александровичу ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование очистки от сероводорода с помощью минеральных хемосорбентов генераторного газа, сжигаемого в энергетических парогазовых установках с газификацией углей» по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» принята к защите 26 октября 2015 года, протокол № 3 диссертационным советом Д 222.001.01 на базе Открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО "ВТИ"), г. Москва, ул. Автозаводская, д.14, 115280, приказ № 156/нк от 01 апреля 2013 года ( с изм. 21 апреля 2014 года приказ № 215/нк ).

Соискатель Строков Андрей Александрович 1982 года рождения, гражданин РФ, работает научным сотрудником лаборатории очистки газов от оксидов серы отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций ОАО «ВТИ».

В 2004 году соискатель окончил Московский государственный университет инженерной экологии [(ныне Институт химического машиностроения им. Л.А. Костандова ФГБОУ ВПО “Московский государственный машиностроительный университет” (МАМИ)].

В 2012 году окончил аспирантуру при Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт».

Диссертация выполнена в лаборатории очистки газов от оксидов серы отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций Открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт».

Научный руководитель – кандидат технических наук, Епихин Андрей Николаевич, заведующий лабораторией очистки газов от оксидов серы отделения защиты атмосферы от вредных выбросов электростанций ОАО "ВТИ".

Официальные оппоненты:

1. Шпирт Михаил Яковлевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки ордена Трудового Красного Знамени института нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН).

2. Николайкина Наталья Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» института инженерной экологии и химического машиностроения в составе Московского государственного машиностроительного университета («МАМИ»).

Официальные оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном д.т.н., заведующим отделом ПГС кафедры паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ», профессором Росляковым П.В. и к.т.н., ученым секретарем отдела ПГС кафедры паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ», к.т.н., доцентом Ионкиным И.Л. и утвержденном проректором НИУ «МЭИ» по научной работе В.К.Драгуновым в своем положительном заключении указала, что диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития отечественной энергетики, результаты диссертационной работы представляют научную ценность для обоснования процессов высокотемпературной сероочистки генераторного газа с использованием железомарганцевых руд, а рассмотренные технические решения имеют практическую значимость; работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Строков Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических

наук по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты.

Соискатель имеет 11 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 9 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 5 работ, в сборниках докладов всероссийских конференций – 2 публикации.

В них в полной мере отражено содержание диссертации: результаты лабораторных и стендовых экспериментов по очистке генераторных газов от сероводорода с помощью минеральных железомарганцевых хемосорбентов, результаты исследования побочных реакций с топливными компонентами ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ), содержащимися в газах, разработанные принципиальные схемы и технические решения по применению минеральных хемосорбентов в энергетике и на химических предприятиях. Экспериментальные исследования, отраженные в научных статьях, и анализ результатов выполнены при непосредственном участии соискателя.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Епихин, А.Н. Исследование устойчивости природных железомарганцевых сорбентов сероводорода в среде синтез-газа / А.Н. Епихин, А.А. Сомов, А.А. Строков [и др.] // Газохимия. – 2011. – № 3–4 (19–20). – С. 85–91.

2. Епихин, А.Н. Перспективы использования природных железомарганцевых сорбентов сероводорода для высокотемпературной очистки синтез-газа / А.Н. Епихин, И.О. Крылов, А.А. Строков [и др.] // Электрические станции. – 2012. – № 2. – С. 29–34 = Prospects for the use of natural ferromanganese sorbents of hydrogen sulfide for high-temperature cleaning of syngas / A.N. Epikhin, I.O. Krylov, A.A. Strokov [et al.] // Power Technology and Engineering. – 2012. – Vol. 46. – Is. 2. – P. 143–148.

3. Строков, А.А. Исследование высокотемпературой сероочистки синтез-газа природной железомарганцевой рудой в кипящем слое / А.А. Строков, А.Н. Епихин, В.И. Угначёв, К.В. Тимашков // Энергетик. – 2012. – № 11. – С. 39–41.

4. Крылов, И.О. Расширение ресурсной базы марганецсодержащего сырья на основе использования руд окисленного типа в теплоэнергетике и производстве

наноматериалов / И.О. Крылов, Т.И. Юшина, А.Н. Епихин, А.А. Строков // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 70–74.

На диссертацию и автореферат поступили 8 отзывов от различных научных и научно-производственных организаций, связанных с тематикой диссертационной работы. Все отзывы положительные.

Основные замечания следующие:

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново, подписанный заместителем заведующего кафедрой «Тепловые электрические станции», к.т.н., доцентом Ледуховским Г. В и секретарем ученого совета ИГЭУ Ширяевой О.А..

1. Не приведено данных о показателях точности и прецизионности полученных автором и обсуждаемых в диссертации экспериментальных данных. Каковы значения доверительных интервалов для этих данных? Как соотносятся величины выявленных автором эффектов с погрешностями прямых или косвенных измерений тех же параметров?

2. В автореферате отсутствуют заявленные автором «...принципиальные технологические схемы установок высокотемпературной сероочистки парогазовых установок с внутрицикловой газификацией малой и большой мощности и энергетических установок с твердооксидными топливными элементами, работающих на генераторном газе». Работа представлена по специальности 05.14.14, поэтому такая информация в автореферате необходима.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново, подписанный заведующим кафедрой промышленной экологии, к.х.н., доцентом Гущиным А.А. и ученым секретарем Ученого Совета ИГХТУ, к.т.н., доцентом Гординой Н.Е.

1. В испытаниях по очистке реального генераторного газа не определена динамическая сероёмкость железомарганцевых хемосорбентов. Неясно, какое время пребывания генераторного газа в адсорбере рекомендуется.

2. В автореферате не приведены расчеты кинетики процесса хемосорбции сероводорода железомарганцевыми рудами и не оценено время реакции сероводорода с оксидами металлов.

3. При проведении сравнительной технико-экономической оценки разработанного метода высокотемпературной сероочистки не учтены затраты на хранение и утилизацию хемосорбента, выработавшего свой ресурс.

Открытое акционерное общество "Энергетический институт им. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН»), г. Москва, подписанный заведующим лабораторией «Энергоэффективность и экология в электроэнергетике» ОАО «ЭНИН», к.т.н. Сапаровым М.И. и ученым секретарем ОАО «ЭНИН» д.т.н. Корценштейном Н.М.

1. В автореферате не отражены вопросы утилизации минерального хемосорбента, отработавшего свой ресурс.

2. В автореферате не приведена оценка габаритных размеров основного оборудования сероочистки генераторного газа. Какой диаметр реактора необходим для сероочистки генераторного газа для мощной ПГУ?

Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (РГУ нефти и газа им. Губкина), подписанный заведующей лабораторией защиты воздушного бассейна ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина», д.т.н., профессором Кулиш О.Н.

1. В автореферате не представлены разработанные технологические схемы установок высокотемпературной сероочистки, не приводятся данные по способам утилизации отработанного хемосорбента.

2. Данные по динамической ёмкости минеральных железомарганцевых хемосорбентов представлены по результатам экспериментов с модельными газовыми смесями. Такие данные для реального генераторного газа не приведены.

Семибратовская фирма «Научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов» («СФ НИИОГАЗ»), Ярославская обл., п. Семибратово, подписанный генеральным директором Курицыным Н.А.

Замечаний нет.

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), подписанный начальником лаборатории газовой серы, к.т.н. Мотиным Н.В. и ведущим научным сотрудником, к.т.н. Шкляром Р.Л.

1. Не приведен ожидаемый химический состав генераторного газа, а также производительность и режим работы газоочистной установки, рекомендуемой к промышленному использованию.

2. Не приведены данные по динамической сероёмкости рекомендуемого к использованию минерального хемосорбента при очистке реального генераторного газа.

3. В технико-экономической оценке не обоснована утилизация продукта низкотемпературной очистки в виде элементарной серы, высокотемпературной очистки в виде пиросульфита натрия.

Открытое акционерное общество "Институт Теплоэлектропроект" (ОАО "ТЭП"), подписанный заместителем главного инженера – начальником технического отдела, к.т.н. Шабановым И.И.

1. В автореферате представлены технические решения по применению найденного природного хемосорбента, однако не приведены разработанные технологические схемы установок сероочистки газов газификации.

2. Из приведенных в автореферате данных не ясны необходимые объемы хемосорбента для сероочистки генераторных газов и габариты реакторов сероочистки.

3. По результатам экспериментальных исследований в качестве оптимального природного хемосорбента выбрана железомарганцевая руда Аскизского месторождения. На сколько хватит запасов этого месторождения при использовании руды для сероочистки генераторных газов на мощных ПГУ с газификацией?

Ассоциация газотурбинных технологий для энергетики и промышленности, г. Москва, подписанный исполнительным директором, к.т.н. Гончаровым В.В.

1. В качестве показателя прочности железомарганцевых руд приводится их микротвердость [кгс/мм<sup>2</sup>], вследствие чего сложно сравнить их по этому показателю с существующими синтетическими поглотителями, показателем прочности которых является индекс прочности на раскалывание [кг/мм].

2. В автореферате не приведены данные стендовых экспериментов по динамической ёмкости минеральных хемосорбентов к сероводороду при очистке газа газификации нефтяного кокса.

Официальными оппонентами и ведущей организацией выбраны специалисты и организация, обладающие высокой квалификацией и известные своими достижениями, в частности, в области сжигания и газификации твердого топлива, очистки газов и энергетических парогазовых установок и имеющие публикации, относящиеся к теме диссертации. Они квалифицированно оценили значимость исследования и определили научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан новый подход для высокотемпературной сероочистки газов газификации углей с применением железомарганцевых руд, обогащающий научную концепцию использования природных материалов для очистки газов от сернистых соединений;

предложена эффективная природная железомарганцевая руда отечественного месторождения «Аскизское» для очистки генераторных газов от соединений серы методом химической сорбции при высоких температурах (500–600 °С);

доказана перспективность и эффективность применения предлагаемого метода высокотемпературной сероочистки генераторных газов для мощных энергетических парогазовых установок с газификацией углей взамен традиционных абсорбционных методов сероочистки при низких температурах, определяющиеся снижением удельной стоимости узла сероочистки для энергетической установки более чем в 4 раза и повышением КПД установки на 2,12 % абсолютных.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения о применимости дешевых и доступных природных материалов – железомарганцевых руд – для обессеривания синтетических газов перед их сжиганием в парогазовых установках;

применительно к проблематике диссертации разработан и результативно использован комплекс базовых методов исследования: экспериментальных методик определения удельной поверхности, истинной и насыпной плотности, величины пылеуноса, микротвердости, химического состава газовых фаз, химического и минералогического состава твердых фаз, динамической емкости по сероводороду исследованных минеральных руд;

доказана применимость для обессеривания генераторного газа конкретной железомарганцевой руды по всем предъявляемым к хемосорбентам критериям;

раскрыта сложная связь между сероемкостью исследованных железомарганцевых руд и их пригодностью к промышленному применению;

изучено влияние состава руд на их сероемкость, устойчивость к протеканию побочных химических реакций между компонентами руд и генераторного газа ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) при 400-800 °С.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

разработаны технические решения и технологические схемы высокотемпературной сероочистки генераторного газа с применением минерального железомарганцевого хемосорбента для энергетических парогазовых установок; энергетических твердооксидных топливных элементов; установок синтеза химических веществ;

определены области применения предлагаемой технологии в энергетике и химической технологии;

создан научный задел для разработки эффективной и малозатратной технологии высокотемпературной сероочистки генераторных газов, сжигаемых на парогазовых установках с газификацией углей;

Оценка достоверности результатов исследования выявила: экспериментальные лабораторные и стендовые данные получены с

использованием обоснованных методик испытаний, современных аттестованных контрольно-измерительных приборов и методов обработки данных;

применение природных железомарганцевых руд для высокотемпературной сероочистки базируется на теории и практике использования соединений железа и марганца для связывания сероводорода;

значения динамической емкости природных хемосорбентов сероочистки, получены автором и подтверждаются данными других поглотителей синтетического происхождения.

Личный вклад автора заключается в разработке и создании лабораторных и стендовых установок, составлении программ испытаний, подготовке и проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, разработке технологических схем высокотемпературной сероочистки, технических решений и практических рекомендаций по использованию минерального железомарганцевого хемосорбента, подготовке основных научных публикаций по выполненной работе.

На заседании 21 января 2016 года диссертационный совет принял решение присудить Строкову А.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 9 докторов наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – 16, против присуждения учёной степени – 0, недействительных бюллетеней – нет.

Ни у кого нет замечаний? Есть предложение принять заключение в целом. Кто за? - 16. Воздержался - нет, против - нет. Всем спасибо.

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

21 января 2016 года



Тумановский А.Г.

Березинец П.А.