#### ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шахрая Сергея Георгиевича

«Повышение энергетической эффективности и экологических показателей оборудования для производства первичного алюминия»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика».

### Актуальность темы диссертации.

Проблема энергосбережения является многие годы (начиная с 70-ых годов прошлого столетия) актуальной для подавляющего большинства государств мирового сообщества. Для России она наиболее значима, в связи с тем, что многие десятилетия задачи энергосбережения и энергоэффективности при разработке новых технологий в подавляющем большинстве случаев не являлись приоритетными. В последние два десятилетия в государственной политике энергосбережения наметились серьезные изменения, но реальные процессы совершенствования основных энергозатратных технологий (в том числе и в цветной металлургии)с целью повышения их ресурсоэффективности происходят слишком медленно. Во многом это обусловлено отсутствием хорошей научнотехнической базы для проведения опытно-конструкторских работ по повышению энергоэффективности конкретных технологий предприятий цветной металлургии РФ. В этой связи тема диссертации С.Г. Шахрая, целью которой является разработка научно-обоснованного комплекса технических и технологических решений, направленных на повышение энергетической эффективности и экологических показателей теплотехнического оборудования для производства первичного алюминия, безусловно актуальна.

По своему содержанию, цели, задачам исследования и методам их решения, защищаемым положениям и основным полученным результатам рецензируемая диссертация в полной мере соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность,

энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждена Указом Президента РФ 07 июля 2011 года).

Актуальность диссертации С.Г. Шахрая также подтверждается и тем, что экология и охрана окружающей среды в двадцать первом веке становится важнейшей проблемой подавляющего большинства развитых государств, в том числе и России, а одной из основных задач диссертационного исследования С.Г. Шахрая является разработка способов повышения эффективности процессов, обеспечивающих снижение уровня выбросов загрязняющих веществ, содержащихся в сжигаемых анодных газах.

### Общая характеристика работы.

Диссертационная работа С.Г. Шахрая состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Рукопись содержит 289 страниц текста, 123 рисунка и 33 таблицы. Список литературы включает 273 наименования источников.

Автор диссертации достаточно убедительно обосновывает во введении актуальность проведенных им экспериментальных и теоретических исследований, формулирует цель и задачи работы, выделяет новизну и практическую значимость полученных им при выполнении диссертационного исследования результатов.

В первой главе приведены результаты выполненного автором диссертации анализа современного состояния энергетической эффективности и экологической безопасности процессов работы электролизёров первичного алюминия. Большое внимание в этой главе уделено не только описанию наиболее значимых экспериментальных и теоретических результатов, полученных ранее при решении задач повышения энергетической эффективности и экологической безопасности алюминиевых электролизёров. Критический анализ проблемы, выполненный автором, показал, что технологические, конструкционные и эксплуатационные параметры системы газоудаления электролизёров не соответствует современному уровню развития технологии электролиза.

Проведенный анализ научно-технической литературы и патентов по тематике диссертационного исследования С.Г. Шахрая стал базой для обоснования цели работы и задач исследования.

экспериментальных Вторая глава посвящена описанию методик исследований, использовавшихся автором диссертации (методика исследования физических свойств материалов укрытия анодного массива алюминиевого электролизёра; методика определения теплопроводности материалов укрытия анодного массива; методика определения технологических параметров горения смолистых веществ, содержащихся в сжимаемых анодных газах; методика оценки эффективности работы системы импульсной автоматической очистки горелок от пыли; методика определения тепловых и газодинамических параметров газовых влияния температуры загружаемого потоков; методика определения электролизёр глинозема на время его растворения в электролите; методика оценки газосборного поверхность теплоизолированного тепловых потерь через колокола). Следует отметить высокий уровень метрологического обеспечения использовавшегося автором в экспериментах оборудования и средств регистрации основных характеристик исследовавшихся процессов.

В третьей главе выполнен анализ потерь напряжения и затрат электроэнергии на преодоление сопротивления газосодержащего прианодного слоя электролита, потерь теплоты поверхностями электролизёра и с удаляемыми системой газоудаления анодными газами. Проведено также математическое моделирование процессов движения и схода пузырей анодного газа из под анодов различных размеров в рамках модели вязкой жидкости. Решена система осредненных по Рейнольдсу уравнений Новье-Стокса.

Результаты теоретических исследований, описанные в этой главе, стали основой для разработки технических и технологических решений, обеспечивающих снижение затрат энергии на преодоление сопротивления газосодержащего слоя электролита, компенсацию потерь теплоты электролизёром в окружающую среду, на транспорт анодных газов по газоходной сети корпуса

электролизёра, возможность создания бесколокольного анодного кожуха самообжигающегося анода. В этой главе сформулированы предложения: по снижению потерь теплоты поверхностями алюминиевого электролизёра, по утилизации теплоты процесса электролиза, по снижению затрат энергии на эксплуатацию газоходной сети корпуса электролиза. В третьей главе также приведены результаты экспериментальных исследований по оптимизации свойств материалов укрытия анодного массива.

Четвертая глава диссертации С.Г. Шахрая посвящена разработке по результатам теоретических и экспериментальных исследований технических решений, обеспечивающих возможность повышения экологической безопасности электролизёров для получения алюминия за счет выбора геометрических и технологических параметров работы системы газоудаления, соответствующих современным условиям электролиза. В этой главе определены геометрические параметры газосборного колокола и горелки с использованием критериев гидродинамического подобия.

В пятой главе проведена оценка влияния газовых и пылевых балластных примесей на эффективность работы горелок дожигания анодных газов алюминиевого электролизёра. Также определены предельные условия подавления горения балластными примесями, исследована устойчивость работы одиночной горелки при различных концентрациях негорючих примесей на входе в горелку. Установлена необходимость оптимизации избытка воздуха, подаваемого в зону горения. Проведен анализ закономерностей коагуляции пылевых частиц в горелке. Исследована седиментация пылевых конгломератов и отдельных частиц в горелке. По результатам выполненных в этой главе теоретических исследований показано, что захват и унос системой газоудаления конгломератов размером от 300 мкм и более возможны за счет создания в потоке дополнительной силы, связанной с относительным ускорением среды вокруг частиц. Полученные результаты создали объективные предпосылки для разработки оригинальной системы импульсной автоматической очистки горелок и газоходов от отложений.

Шестая глава диссертации посвящена описанию результатов работы автора по верификации теоретических положений, являющихся основой повышения энергетической эффективности и экологической безопасности электролизёров для получения алюминия путем их сопоставления с полученными в промышленных условиях опытными данными. Проведены испытания: системы импульсной автоматической очистки горелок от отложений; работы горелок в условиях регулирования в них разряжения; теплоизолированного газосборного колокола; системы загрузки в расплав предварительно нагретого глинозема. Также выполнены лабораторные исследования температурных режимов сжигания смолистых веществ, входящих в состав анодных газов.

В седьмой главе проведены оценки энергетической, экологической и экономической эффективности результатов диссертационного исследования автора и иллюстрации внедрения разработок автора в виде технических и технологических решений в производство.

В заключении автор диссертации обобщает результаты своих исследований и обосновывает вывод о том, что им разработаны научно обоснованные технические и технологические решения по совершенствованию теплоиспользующих установок получения первичного алюминия и повышению их экологических характеристик.

# Общая методология и методика исследования.

Методики исследований, применяемые в диссертации С.Г. Шахраем, включают в себя комплекс теоретических и экспериментальных подходов к изучению процессов горения, тепло- и массопереноса, аэрогазодинамики в условиях работы алюминиевых электролизёров и в их системах газоудаления. Достоинством диссертации является логичное сочетание теоретических исследований в виде численного моделирования и экспериментального изучения закономерностей рассматриваемых процессов в лабораторных условиях и в производственных. Автор диссертации применил современный математический аппарат для решения отдельных, относящихся к проблематике диссертационного

исследования задач горения, движения вязкой жидкости, теплопереноса в неоднородных средах. При проведении экспериментальных исследований использованы хорошо известные и использующиеся многими исследователями методики (например, определения теплопроводности материалов, измерение объемов газоудаления, регистрации температуры электролита до и после загрузки в него глинозема). Автор модифицировал эти методики применительно к решению задач своего диссертационного исследования, расширив возможности этих методик на группу процессов, протекающих в электролизёрах и системах связанных с ними одним технологическим циклом. При разработке и выборе математических моделей для описания изучаемых в диссертации процессов автор использовал современные представления о турбулентных течениях газов, гетерогенных сред, частиц и их конгломератов. При планировании и проведении экспериментальных исследований и обработке результатов соответствующее современным требованиям внимание было уделено анализу систематических и случайных погрешностей результатов измерений. По результатам анализа и обобщения установленных при проведении экспериментальных и теоретических исследований основных закономерностей исследуемых в диссертации процессов С.Г. Шахрай разработал большую группу технических и технологических решений, приоритет которых закреплен патентами РФ на способы и устройства, которые могут использоваться (часть уже используется в производстве алюминия). При этом большая часть этих технических и технологических решений прошла проверку на производстве.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендации, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных автор результатов и, соответственно, защищаемых положений и выводов определяется логической связанностью всех этапов диссертационного исследования. Выполнен большой объем достаточно сложных по подготовке, проведению и обработке результатов экспериментальных исследований и промышленных испытаний аэрогазодинамических и

теплотехнических процессов в основных элементах конструкции алюминиевых электролизёров и их систем газоудаления. При проведении теоретических исследований использованы хорошо апробированные при решении других задач динамики вязкой жидкости и теплопереноса модели. Для регистрации основных характеристик исследовавшихся в экспериментах процессов использовались методики и алгоритмы, средства регистрации, апробированные соответствующую метрологическую экспертизу. Верификация результатов математического моделирования в ряде случаев проведена по данным испытаний. Bce промышленных основные экспериментов И защищаемые положения сформулированы автором на основании детального анализа и последующего обобщения результатов выполненных им экспериментов и численных исследований. Результаты, полученные С.Г. Шахраем, многократно апробировались на авторитетных международных и всероссийских конференциях, что также является косвенным обоснованием достоверности и обоснованности основных результатов и выводов, представленных в диссертации С.Г. Шахрая. Главным же доказательством достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в рецензируемой диссертации, является использование группы разработанных авторов технических и технологических решений на предприятиях алюминиевой промышленности.

# Научная новизна полученных результатов.

- С.Г. Шахраем получена большая группа результатов экспериментальных и теоретических исследований, соответствующих в полной мере критерию новизны. Последнее подтверждается публикациями статей в ведущих журналах РФ (в том числе журналах РАН), входящих в список изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Наиболее значимыми из них, по мнению оппонента, являются следующие:
  - 1. Обоснован комплекс взаимосвязанных мероприятий по энергосбережению при работе алюминиевых электролизёров Содерберга,

- ориентированных на сокращение потерь теплоты поверхностями электролизёра, утилизацию теплоты анодных газов, уменьшение затрат энергии на нагрев и растворение в электролите глинозема, снижение объема прианодного газоэлектролитного слоя, формирующегося в результате окисления анода.
- решению проблемы повышения 2. Разработан новый подход К эффективности улавливания И обезвреживания образующихся алюминиевом электролизёре загрязняющих веществ. Новизна подхода заключается TOM, что система газоудаления алюминиевого электролизёра рассматривается как система, в которой характер и интенсивность аэрогазодинамических, И массообменных теплопроцессов, протекающих в каждом ее элементе конструкции, является определяющей в оценке эффективности работы смежных элементов.
- 3. По результатам теоретических исследований установлено, что эффективная очистка газоходных сетей корпусов электролизёра от пылевых отложений возможна при закрутке потока анодных газов за счет ввода в газоход сжатого воздуха под углом от 38° до 48° по отношению к его продольной оси.
- 4. По результатам математического моделирования обосновано оборудование горелок дисковыми турбулизаторами и определены их конструктивные параметры, обеспечивающие увеличение пути смешивания сжигаемых в них анодных газов с воздухом. Также обоснована возможность регулирования при этом разряжения в системе газоудаления.
- 5. Разработана методология теплотехнического расчета системы газоудаления электролизёров с самообжигающимся анодом, обеспечивающая возможность комплексного анализа влияния геометрических и режимных параметров газосборного колокола, горелок

- и газоходной сети на ее технико-экономическую эффективность в условиях увеличения силы тока процесса электролиза.
- 6. По результатам исследования процессов воспламенения и горения основных компонентов смолистых веществ, содержащихся в сжигаемых анодных газах (нафталина, антрацена и бензапирена), установлены температурные диапазоны их горения. Также показано, что при температурах более 750°C полное дожигание нафталина и антрацена достигается в течение периодов времени 0,5с и 0,2с, соответственно.
- 7. С использованием теоретических следствий, полученных автором диссертации, разработаны технические решения по конструкциям газосборного колокола, отличающиеся от известных 1,5 2 кратным увеличением объема подколокольного пространства и конфигурацией его поперечного сечения. Усовершенствования конфигурации газосборного колокола обеспечивают улучшение условий работы горелок за счет снижения в 3-4 раза аэродинамического сопротивления, а также исключение образования вторичных течений анодных газов и повышение эффективности сбора анодных газов до уровня 94-96%.

### Практическая значимость.

Практическая значимость диссертационное исследование С.Г. Шахрая достаточно очевидна и подтверждается двадцатью девятью патентами на способы и устройства, а также документами (приложения к рукописи диссертации), подтверждающими внедрение и использование результатов диссертационной работы С.Г. Шахрая на ведущих предприятиях — производителях первичного алюминия в России.

Кроме того автором диссертации подготовлены и изданы две монографии, которые могут быть чрезвычайно полезны инженерам, работающим на предприятиях цветной металлургии, а также студентом и аспирантом технических университетов металлургического профиля.

Замечания по диссертационной работе.

- 1. Во второй главе при описании методик экспериментальных исследований автор диссертации приводит, как правило, характеристики систематических (или методических) погрешностей методик и средств измерений, но не проводит анализ случайных ошибок. Хотя даже в справочниках по теплофизическим характеристикам материалов, как правило, приводят оценки таких погрешностей.
- 2. Решение очень сложной задачи циркуляции электролита при воздействии газовых пузырей представляет не только практический, но и фундаментальный интерес. К сожалению, автором не проведены результаты верификации использовавшейся методики при движении газовых пузырей вблизи поверхности моноблочного и секционного анодов.
- 3. Состав продуктов горения нафталина при высоких (700, 750С) температурах определяется в интервалах времени 0,5с, а антрацена 0,2с. В то же время, известно, что современные методы газового анализа работают в интервалах времени от 10-15 секунд и более. Ни в главе 2, ни в шестой главе не приведено обоснование возможности определения состава продуктов сгорания за интервалы времени 0,2с и 0,5с. На рис. 6.20 (стр. 223) приведены данные по составу продуктов горения антрацена для интервала времени более 360 секунд, которые иллюстрируют процесс непрерывного изменения концентраций во времени.
- 4. Недостатком работы, по мнению оппонента, является очень краткие описания алгоритмов перехода от результатов теоретических исследований к разработке технических решений по совершенствованию технологий, рассматривающихся в диссертации.
- 5. Есть шероховатости при оформлении рисунков в рукописи диссертации. Так, например, на стр. 131 (рис. 4.7) в подписи к рисунку используется

- словосочетание «от избытка  $\alpha$ » (пропущено слово воздуха), ось абсцисс не обозначена.
- 6. В разделе 4.2 приведено решение очень сложной задачи сжигания анодного газа в горелках, полученное с помощью пакета программ Sigma Flow, но в этом разделе нет ссылок на публикацию полученных при решении этой задачи результатов (есть только ссылка на патент). Остается открытым вопрос о том, опубликованы ли эти результаты в печати.
- 7. В этом же разделе на рис. 4.9 (стр. 135) приведены немонотонные зависимости скорости и времени нахождения сжигаемых анодных газов полученные результате математического В зоне горения, моделирования, от коэффициента избытка воздуха. Температура же с меняется монотонно. Анализ причин немонотонности ростом приведенных на рис.4.9 зависимостей в тексте раздела отсутствует. Физических предпосылок их существования в постановке задачи нет. Поэтому некоторые возникают сомнения В надежности программного продукта И, соответственно, использовавшегося достоверности этих результатов теоретических исследований.

Ценность полученных в диссертации С.Г. Шахрая результатов, положений и выводов отмеченные недостатки не снижают. Диссертация С.Г. Шахрая является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований, соответствующие критерию новизны, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация С.Г. Шахрая соответствует специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована. Автор диссертации опубликовал

25 статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов докторских диссертаций, две монографии и получил 29 патентов на изобретения и полезные модели по теме диссертации.

## Заключение о соответствии диссертации критериям.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации С.Г. Шахрая «Повышение энергетической эффективности и экологических показателей оборудования для производства первичного алюминия» можно сделать обоснованное заключение о ее соответствии требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.16 г. № 335), а ее автор Сергей Георгиевич Шахрай заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Официальный оппонент,
Главный научный сотрудник
Инженерной школы энергетики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
доктор физико-математических наук,

Кузнецов Гений Владимирович

600 23,052018

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,

ФГАОУ ВО НИ ТПУ E-mail: <u>marisha@tpu.ru</u> Сайт: http://tpu.ru/

профессор

сайт: http://tpu.ru/ тел.: 8(3822)606-248

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю

Ученый секретарь Надионального исследовательского Томского политехнического университета

Ананьева Ольга Афанасьевна