

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 21 декабря 2018 года публичной защиты диссертации Войткова Ивана Сергеевича «Экспериментальное исследование температуры и скорости парогазовой смеси за испаряющимися каплями жидкости при их движении через высокотемпературные газы» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
6.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
8.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
9.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
10.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
11.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
12.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
13.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
14.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
15.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
16.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
17.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
18.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
19.	Якутенок Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

В связи с кончиной председателя диссертационного совета доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича заседание провел заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить И. С. Войткову ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,
созданного на базе федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от 21.12.2018 № 360

О присуждении **Войткову Ивану Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Экспериментальное исследование температуры и скорости парогазовой смеси за испаряющимися каплями жидкости при их движении через высокотемпературные газы»** по специальности **01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника** принята к защите 12.10.2018 (протокол заседания № 347) диссертационным советом Д 212.267.13, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Войтков Иван Сергеевич**, 1991 года рождения.

В 2015 году соискатель окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

С 01.09.2015 соискатель очно обучается в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (плановая дата окончания аспирантуры – 31.08.2019).

В настоящее время не трудоустроен.

Диссертация выполнена в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Стрижак Павел Александрович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, профессор.

Официальные оппоненты:

Дулин Владимир Михайлович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физических основ энергетических технологий, старший научный сотрудник

Афанасьев Валерий Никанорович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра Э-6 «Теплофизика», профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Новосибирский государственный технический университет**», г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном **Елистратовым Сергеем Львовичем** (доктор технических наук, доцент, кафедра «Тепловые электрические станции», заведующий кафедрой), указала, что в группе отраслей промышленности, таких как теплоэнергетика, металлургия и нефтехимия, широко используются газопарожидкостные потоки, характеристики которых в значительной мере влияют на протекающие в соответствующих аппаратах, агрегатах, блоках и теплообменных установках процессы и на гидравлический режим. Однако в литературе слабо отражен вопрос изменения температуры и скорости парогазовой

среды в следе капельного потока и даже в следе одиночных и малой группы капель. Поэтому диссертационная работа является актуальной и полученные результаты имеют большое фундаментальное значение. И. С. Войтковым впервые с высокой точностью и малой инерционностью экспериментально изучены температурные и аэродинамические следы одиночных, малой группы капель и аэрозоля при движении через высокотемпературные газы за счет комбинированного применения контактных и бесконтактных методов измерений; установлено влияние первой капли на условия испарения второй и всех последующих; рассмотрены схемы с двумя, тремя и пятью каплями; показано, что лишь при удалении капель относительно друг друга на 10–12 радиусов они не влияют на прогрев и испарение соседних; определены диапазоны изменения температур и скоростей парогазовой смеси в следе аэрозольных потоков; объяснены отличия характеристик рассмотренных следов капель воды, суспензий, растворов и эмульсий на ее основе. Установленные И. С. Войтковым в процессе экспериментальных исследований закономерности испарения и механизмы формирования температурных и аэродинамических следов позволят контролировать процессы теплообмена в двухфазных системах и варьировать временные характеристики процессов для большой группы отраслей промышленности.

Соискатель имеет 33 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 25 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 14 работ (из них в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science и Scopus, опубликовано 7 работ, в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science, опубликованы 3 работы); в сборниках материалов международных научных конференций опубликованы 3 работы; патент на изобретение получен 1. Общий объем публикаций – 15,32 л., авторский вклад – 5,86 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых

должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Войтков И. С.** Определение температуры газов при прохождении через них водного аэрозоля / И. С. Войтков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Письма в журнал технической физики. – 2017. – Т. 43, вып. 6. – С. 48–55. – 0,35 / 0,14 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Voytkov I. S. Studying gas temperature variation upon aerosol injection / I. S. Voytkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // Technical physics letters. – 2017. – Vol. 43, № 3. – P. 301–304. – DOI: 10.1134/S1063785017030269.

2. **Войтков И. С.** Высокотемпературное испарение капель воды в газовой среде / И. С. Войтков, Р. С. Волков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, вып. 12. – С. 1911–1914. – 0,37 / 0,15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Voytkov I. S. The High-Temperature Evaporation of Water Droplets in a Gaseous Medium / I. S. Voytkov, R. S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // Technical Physics. – 2017. – Vol. 62, № 12. – P. 1908–1911. – DOI: 10.1134/S1063784217120271.

3. **Voytkov I. S.** Temperature traces of water aerosols, water-based emulsions, solutions and slurries moving in a reversed flow of high-temperature gases / I. S. Voytkov, R. S. Volkov, O. S. Lutoshkina, G. V. Kuznetsov // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – Vol. 98. – P. 20–29. – DOI:10.1016/j.expthermflusci.2018.05.021. – 1,15 / 0,47 а.л. (*Web of Science*).

На автореферат поступили 4 положительных отзыва. Отзывы представили:

1. **А. А. Шаклеин**, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории физико-химической механики Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Ижевск, *с вопросами:* наблюдались ли в области следа при обтекании одной или нескольких капель заметные нестационарные эффекты, и могут ли нестационарные эффекты в следе одной капли повлиять на скорость ее испарения? как автор может объяснить наблюдаемую зависимость размера температурного следа от скорости потока, описанное на стр. 15?, и *с замечанием:* на рисунке 10 в легенде представлены зависимости экспоненциального вида, но с

точки зрения качественного анализа наблюдается несоответствие выражений с экспонентой, не имеющий экстремума и характеризуемой положительной второй производной, изображенным кривым, имеющий экстремум (максимум) и отрицательную вторую производную.

2. **В. И. Присадков**, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник научно-исследовательского центра нормативно-технических проблем пожарной безопасности Всероссийского ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, *с замечаниями*: в разделе об актуальности помимо специалистов в области фундаментальных экспериментальных исследований, проводимых с применением контактных и бесконтактных средств, следовало назвать специалистов, проводящих прикладные исследования, в том числе в области пожаротушения; основные научные результаты исследований, состоящие во впервые полученных полях температуры и скорости за каплями, представлены в автореферате в черном-белом варианте, что затрудняет восприятие.

3. **Р. А. Дехтярь**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории процессов переноса Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, *с замечаниями*: непонятно, почему на рисунке 5, где показано влияние процесса испарения на формирование низкотемпературного следа в качестве обтекаемого тела используется частица глины.

4. **Н. Н. Головин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., заместитель начальника отделения – начальник отдела АО «Корпорация «МИТ», г. Москва, **Е. В. Майская**, начальник сектора – заместитель начальника отдела АО «Корпорация «МИТ», г. Москва, **А. А. Шустов**, начальник сектора АО «Корпорация «МИТ», г. Москва, *с замечаниями*: на рисунке 5 в схеме проведенного эксперимента конкретно указана «капля воды», хотя из описания эксперимента и приведенных результатов ясно, что объектом испытаний также являлась «частица глины»; в третьей главе вывод автора о неэффективности (нерациональности) ввода в высокотемпературный поток даже распыленной воды в большом количестве, представляется малообоснованным, так как в автореферате не приведены критерии эффективности этого процесса; в автореферате присутствуют грамматические ошибки и опечатки.

В отзывах отмечается, что диссертационная работа посвящена исследованию теплофизических процессов, протекающих в следах капель. Особенность работы заключается в применении уникального подхода с использованием группы контактных и бесконтактных методов измерений к исследованию температурных и аэродинамических следов как одной и нескольких капель, так и аэрозоля, образующихся при взаимодействии с высокотемпературным газом. Проводимые исследования ориентированы на выявление фундаментальных закономерностей с целью развития теории теплофизики газопарокапельных систем и повышение количественных и качественных параметров используемых в промышленности установок на их основе. Таким образом, рассматриваемая в данной работе тема является актуальной. Результаты и выводы исследования существенно дополняют имеющиеся теоретические представления о тепломассообменных процессах и могут быть использованы при совершенствовании технологий высокотемпературной очистки воды, а также создании газопарокапельных теплоносителей на основе уходящих дымовых газов и пароводяных смесей. Полученные экспериментальные результаты могут послужить основой для создания новых и совершенствования существующих технологий нагрева и охлаждения капель жидкости в теплотехнических системах. Наиболее значимыми для практического применения являются закономерности влияния длительности импульса на времена существования низкотемпературного следа, а также результаты о степени влияния первой капли на условия испарения второй.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В. М. Дулин** – известный специалист в области исследовании тепломассообменных процессов в двухфазных потоках с использованием панорамных оптических методов PIV, PTV, LIP и др.; **В. Н. Афанасьев** – известный специалист в области исследования интенсивных фазовых превращений жидкостей, а также гидродинамики и теплообмена в газо- и парокапельных системах; **Новосибирский государственный технический университет** известен своими достижениями в области экспериментальных исследований теплотехнических систем (контактные теплообменники, камеры термической и огневой очистки жидкостей и др.), применяемых в газопарокапельных технологиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан оригинальный подход к экспериментальному изучению температурных и аэродинамических следов одиночных и малой группы капель, жидкостного аэрозоля в условиях интенсивного испарения с комбинированным использованием бесконтактных и контактных методов регистрации;

установлены характерные продольные и поперечные размеры температурных и аэродинамических следов капель, а также аэрозоля в условиях интенсивного испарения жидкости (на примере воды, растворов, суспензий и эмульсий на ее основе);

получены зависимости времен сохранения пониженных (относительно исходных) температур парогазовой смеси в следе капель от длительности импульсной подачи аэрозоля, которые иллюстрируют важные фундаментальные и прикладные результаты, например, увеличение длительности импульса в 5 раз приводит к росту времени менее чем в 2 раза;

показано, что роль процесса испарения при формировании температурного следа капель воды вне зависимости от схемы их расположения существенна. Температура в следе капли воды ниже на 30–40 %, чем в опытах с твердыми неиспаряющимися частицами;

установлены масштабы влияния первой (относительно натекающего потока) капли на условия прогрева и испарения второй и всех последующих (на примере схем с двумя, тремя и пятью каплями); показано, что времена испарения первой и каждой последующей капель отличаются более чем на 30 %;

установлены величины падения температуры (на 20–140 К) парогазовой смеси в следе капельного потока, а также значения времен сохранения пониженных температур в этой области (от 3 с до 24 с) для условий, являющихся типичными в газопарокапельных технологиях; в относительных величинах изменение температуры газового потока за счет теплообмена с интенсивно испаряющейся каплей может достигать 30–40 %; скорость же в следе капель зависит от их размера и скорости натекающего газового потока.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

полученные результаты исследований температурных и аэродинамических следов капель и аэрозолей в высокотемпературных газовых средах могут быть использованы при разработке новых и развитии существующих физических и математических моделей тепломассопереноса и фазовых превращений в системах «капля жидкости – разогретые газы», «малая группа капель – разогретые газы» и «капельный аэрозоль – разогретые газы»; новизна экспериментальных данных состоит в том, что они показывают, при каких критических расстояниях между каплями они могут оказывать влияние на прогрев и испарение соседних.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

разработаны рекомендации, с использованием которых можно прогнозировать условия, обеспечивающие эффективное сохранение регламентной температуры газов (продуктов сгорания, воздуха, паров, их смеси) в энергетических технологиях; в диссертации приведены результаты расчетов, которые показывают насколько можно оптимизировать работу современных систем термической очистки жидкостей, подготовки газопарокапельных теплоносителей, а также систем пожаротушения.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные при подготовке диссертации экспериментальные результаты существенно расширяют представления современной теории испарения совокупности капель жидкостей, суспензий, эмульсий и растворов при движении в газовых средах в условиях высокотемпературного нагрева. Сформулированные по результатам диссертационных исследований заключения могут быть использованы при выборе эффективных параметров распыления воды (для максимально полного испарения капель, движущихся на расстоянии относительно друг друга не менее 10–12 радиусов) в ряде теплотехнических приложений, например, очистка поверхностей котельного оборудования газопарокапельными смесями, пожаротушение и др.

Результаты диссертационной работы могут использоваться в различных научных и учебных заведениях, таких как Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича СО РАН, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирский государственный университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, а также в других организациях, занимающихся исследованиями процессов движения интенсивно испаряющихся капель жидкостей в газовых средах, в том числе при подготовке высококвалифицированных специалистов в области теплофизики и теоретической теплотехники.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность полученных в ходе экспериментальных исследований результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных значениях основных параметров, использованием современных высокоточных оптических методов и программно-аппаратных кросскорреляционных комплексов, а также сравнением с теоретическими заключениями других авторов.

Научная новизна результатов диссертационных исследований заключается в том, что впервые с использованием двух оригинальных стендов и разработанной методики, отличающейся от известных комбинированным применением контактных и бесконтактных методов измерений, были установлены основные характеристики температурных и аэродинамических следов одиночных и малой группы капель, аэрозоля при движении через высокотемпературные газы, в том числе с применением оптических методов PIV, PTV, SP, LIP на базе кросскорреляционных комплексов и импульсных лазеров в совокупности с высокоскоростными видеокамерами. Проведены эксперименты по исследованию температурных следов интенсивно испаряющихся капель жидкостей с начальными размерами от 0.5 мм до 3 мм и аэрозоля с размерами капель от 50 мкм до 350 мкм при движении через высокотемпературные (более 500 К) газы. Установлено влияние состава капельного аэрозоля (на примере растворов, суспензий, эмульсий) на значения температур и

времена существования следов с пониженной температурой относительно начальной. Определены основные факторы, оказывающие значимое влияние на температурные и аэродинамические следы испаряющихся капель: температура и скорость газового потока, компонентный состав капель, их начальный размер и количество, схема относительного расположения и др.

Личный вклад соискателя состоит в: совместном с научным руководителем формулировании цели и постановке задач исследований, планировании экспериментов, самостоятельной разработке методик, создании стендов, проведении опытов, обработке результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении результатов, разработке рекомендаций практического использования результатов, формулировке защищаемых положений и выводов.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, состоящей в экспериментальном определении численных значений основных параметров температурных и аэродинамических следов одиночных капель, их малых групп, жидкостного аэрозоля при движении через высокотемпературные газы, имеющей значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 21.12.2018 диссертационный совет принял решение присудить **Войткову И. С.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

21.12.2018



Христенко Юрий Федорович

Пикуцак Елизавета Владимировна