

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический
университет», доктор технических
наук, профессор



/ А.А. Батаев

2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» на диссертационную работу **Войткова Ивана Сергеевича** «Экспериментальное исследование температуры и скорости парогазовой смеси за испаряющимися каплями жидкости при их движении через высокотемпературные газы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.**

В многих отраслях промышленности, таких как энергетика, металлургия и нефтехимия, широко используются двух- и многофазные потоки. В мокрых скрубберах, ректификационных колоннах, генераторах газопаровых теплоносителей, камерах термической очистки воды от примесей, системах пожаротушения и подобных им аппаратах происходит взаимодействие капель жидкости с высокотемпературными парогазовыми потоками. Характеристики двухфазных газожидкостных потоков в значительной мере влияют на протекающие в соответствующих теплообменных аппаратах процессы, их гидравлические режимы и конструктивное исполнение. Главными причинами, сдерживающими развитие высокотемпературных газопарокапельных технологий являются недостаток знаний о физической картине сложных взаимосвязанных процессов теплообмена и эндотермических фазовых превращений в процессе движения капель в парогазовых потоках. В научной литературе данные по изменению температуры продуктов сгорания в следе за капельным потоком представлены в ограниченном количестве, что в значительной мере связано со сложностями экспериментального исследования такого рода процессов. Прямые измерения полей температур с помощью микротермопар являются крайне сложными и искажают физическую картину процесса. Методики, сочетающие контактные и безконтактные методы измерений, позволяют получить адекватные физической картине процесса количественные результаты. В связи с

этим, тема диссертационной работы Войткова Ивана Сергеевича «Экспериментальное исследование температуры и скорости парогазовой смеси за испаряющимися каплями жидкости при их движении через высокотемпературные газы» является актуальной и представляет большой научный и практический интерес.

Диссертационная работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки, техники и технологий в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждена президентом РФ от 07.06.2011 г. № 899) и соответствуют списку критических технологий: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Новизну и значимость результатов исследований также обосновывает выполнение проектов, указанных в диссертации: программа повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект ВИУ–ИШФВП–184/2018), гранты Президента РФ МД–1221.2017.8, РФФИ 14–08–00057, РНФ 14–39–00003 и РНФ 18–19–00056. По публикациям и грантам видно, что работа выполнялась на протяжении практически 5 лет.

Диссертация **состоит из** введения, трех глав, заключения, списка условных обозначений и символов, списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 178 страницах, включает 68 рисунков, 5 таблиц и список из 161 литературного источника.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, показана актуальность темы диссертации, отражена практическая значимость и личный вклад автора, сформулирована научная новизна полученных результатов и защищаемые положения диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор современного состояния исследований в области двухфазных течений, показаны основные конструкции аппаратов, рассмотрены основные методики экспериментальных исследований двухфазных потоков. Отмечены проблемы, сдерживающие до настоящего времени достоверную регистрацию характеристик температурных и аэродинамических следов одиночных капель жидкостей, например, воды, а также малых и больших групп таких капель, в том числе диспергированного аэрозоля.

Вторая глава посвящена описанию разработанных автором экспериментальных стендов и методик исследования в области фазовых превращений капель жидкости. Выделены два крупных раздела, в первом из которых приведена методика исследования характеристик температурного и аэродинамического следов одиночной капли и малой группы фрагментов

жидкости, а во втором акцент сделан на аэрозольных системах. При этом во второй части описания методики приведено описание использованных жидкостных составов – не только воды, но и типичных растворов, суспензий и эмульсий на ее основе.

Третья глава посвящена результатам выполненных экспериментальных исследований температурных и аэродинамических следов одиночных капель, их малых групп, жидкостного аэрозоля при движении через высокотемпературные газы. Рассмотрена группа факторов, определяющих теплообменные процессы и фазовые превращения с использованием бесконтактных и контактных методов измерения. Получены зависимости, представлены аппроксимационные выражения и гипотезы, объясняющие установленные эффекты и закономерности. Приведено описание примеров конкретного использования результатов исследований для оптимизации газопарокапельных технологий.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые экспериментально изучены температурные и аэродинамические следы одиночных капель, малой группы капель и жидкостного аэрозоля при движении через высокотемпературные газы за счет комбинированного применения контактных и бесконтактных методов измерений. Опыты выполнены с применением разработанной оригинальной экспериментальной методики, основанной на использовании сочетания термопарных измерений и оптических методик, а также с применением высокоскоростной видеосъемки. Следует подчеркнуть применение современных оптических методов «Particle Image Velocimetry» (PIV), «Particle Tracking Velocimetry» (PTV), «Shadow Photography» (SP), «Laser Induced Phosphorescence» (LIP), освоенных автором. Определены времена сохранения пониженных температур в следе капли в зависимости от длительности импульса подачи воды. Установлено влияние первой капли на условия испарения второй. В результате проведенных экспериментов определены диапазоны изменения температур в следе капельного потока. Отмечены синергетические эффекты влияния впереди идущих капель на каждую последующую.

Наиболее значимыми являются следующие **научные результаты** автора диссертации:

1. Установленные в опытах с аэрозолем зависимости показывают, что для поддержания необходимого температурного режима целесообразна импульсная подача воды.
2. Для полного испарения группы последовательно перемещающихся в потоке высокотемпературных газов капель жидкости целесообразно обеспечить расстояние между ними не менее $10 \div 12$ радиусов капель.
3. В результате проведенных экспериментов определены диапазоны изменения температур (от 20 до 140 K) в следе капельного потока, а также значения

времен сохранения пониженных температур смеси водяных паров и продуктов сгорания в следе капельного потока (от 3 с до 24 с).

4. Показано, что роль процесса испарения при формировании температурного следа капли воды вне зависимости от схемы их расположения существенна. Температура в следе капли воды значительно ниже (на 30–40 %), чем в опытах с твердыми неиспаряющимися частицами аналогичных размеров.
5. Повышение скорости движения потока нагретого воздуха, например, до 5 м/с приводит к существенному росту размеров аэродинамического следа капли (более чем в 4 раза), но при этом максимальные значения уменьшения температуры воздуха значительно снижаются (в 2–3 раза).

Новизна полученных результатов подтверждается статьями в журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, а также статьями в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, в т.ч. «International Journal of Heat Mass Transfer» (ИФ=3,5), «International Journal of Multiphase Flow» (ИФ=2,5), «Experimental Thermal and Fluid Science» (ИФ=3,2).

Экспериментальные исследования автора диссертации ориентированы не только на получение новых эмпирических данных о температурных и аэродинамических следах жидкостных аэрозолей, но и **являются инструментом для разработки рекомендаций** и определения режимов работы высокотемпературных приложений в области термической очистки жидкостей и пожаротушения.

Достоверность приведенных в рукописи и автореферате диссертации результатов экспериментальных исследований подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных параметрах системы, а также использованием современного оборудования. Результаты исследования сопоставлены с данными других исследователей.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что полученные результаты экспериментов и сделанные заключения могут служить информационной базой для разработки перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий, а также модернизации существующих.

По содержанию рукописи и автореферата диссертации можно сделать **следующие замечания:**

1. При анализе международной периодической литературы, в частности, журналов «International Journal of Heat Mass Transfer», «Fuel», «International Journal of Thermal Science», можно сделать вывод о том, что в 2000–2010 гг. предпринимались активные попытки решить поставленную перед диссертантом задачу во Франции, Великобритании, США. Задача не была решена в полной

мере. Во введении и первой обзорной главе этот вопрос следовало раскрыть более подробно с упором на причины, не позволившие завершить эти исследования.

2. Диссертант получил полезную информационную базу значений температур и скоростей парогазовой смеси. Осталось неясным, почему не была предпринята попытка расчета классических параметров теплообмена с применением локальных значений критерия Нуссельта по поверхности капли. Особый интерес представляет сравнение коэффициентов теплоотдачи на торцевой, боковой и задней поверхностях капли относительно направления набегающего потока.

3. При анализе результатов экспериментов с аэрозольной системой следовало раскрыть более подробно влияние факторов взаимодействия трассерных частиц с каплями жидкости, стенками камеры и спаями термопар. Диссертационная работа позиционируется как экспериментальная и особенности методики следует раскрывать более полно.

4. В выводах диссертации приведены широкие диапазоны изменения двух ключевых регистрируемых параметров: «времена сохранения пониженных температур смеси водяных паров и продуктов сгорания в следе капельного потока (от 3 с до 24 с)»; «температура в следе капельного потока (от 20 до 140 К)». Возникает два вопроса. Первый – в реальной практике требуются такие большие диапазоны или нет? Второй – почему не приведен диапазон изменения скорости движения газов в следе капли?

5. Контактные измерения производились с помощью микротермопар, основные характеристики которых (тип, размеры проводов и спая термопары, калибровка и др.) в работе автором представлены не достаточно полно.

6. В работе не указаны диапазоны изменения основных критериев подобия (числа Рейнольдса, Нуссельта, Вебера и др.), дающих общее представление о физической картине взаимодействия частиц жидкости с потоком газа; не использованы для анализа физической картины процесса известные данные о вихреобразовании за одиночными сферическими частицами в зависимости от режима обтекания.

7. В тексте автореферата имеется ряд опечаток в виде лишних или недостающих знаков препинания и грамматических ошибок, а также присутствуют повторы текста (автореферат, с. 17).

Сформулированные замечания не являются определяющими при оценке научной значимости результатов диссертационной работы.

Исследование проведено на высоком научном уровне и является **завершенной научно-квалификационной работой**. Автореферат **соответствует** основным положениям и выводам диссертации. Материалы диссертации широко представлены в научной литературе и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. Основные результаты работы представлены в 25

научных публикациях по теме диссертации, в том числе в 14 научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК для кандидатских диссертаций, получен один патент. Результаты диссертационных исследований прошли апробацию на профильных конференциях, симпозиумах и семинарах (Томск, Ялта, Москва, Новосибирск) .

Общее заключение по работе.

Диссертационная работа Войткова Ивана Сергеевича «Экспериментальное исследование температуры и скорости парогазовой смеси за испаряющимися каплями жидкости при их движении через высокотемпературные газы» является завершенной научно-исследовательской работой, которая по достоверности, научной новизне и значимости полученных результатов **полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по п.п. 9-14 положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. Постановления правительства Российской Федерации от 01.10.2018г.), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.**

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара кафедры «Тепловые электрические станции» Новосибирского государственного технического университета (протокол № 13 01.11.2018г).

Отзыв составил заведующий кафедрой
«Тепловые электрические станции»,
доктор технических наук, доцент



Елистратов Сергей Львович

Подпись Елистратова Сергея Львовича удостоверяю:

Ученый секретарь НГТУ,
д.ф.- м.н., профессор



Геннадий Михайлович Шумский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Тел. 8-(383) 346-08-43; E-mail: rector@nstu.ru; <http://www.nstu.ru>