

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,  
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛА ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ<sup>1</sup>

© 2023 г. Ю. А. Зейгарник<sup>а</sup>, В. И. Залкинд<sup>а</sup>, В. Л. Низовский<sup>а</sup>,  
Л. В. Низовский<sup>а</sup>, С. С. Щигель<sup>а</sup>, И. В. Маслакова<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Изжорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

\*e-mail: i.v.maslakova@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Представлены результаты комплексного исследования процесса фрагментации воды, сильно перегретой относительно температуры насыщения, при ее истечении через форсунки различного типа. Разработана и отлажена система оптических измерений дисперсионной структуры факела распыла, которая базируется на измерении индикатрисы рассеяния зондирующего лазерного излучения в широком диапазоне углов ( $\pm 45^\circ$ ) и решении обратной задачи рассеяния с помощью теории Ми. Приведены результаты масштабного экспериментального исследования дисперсионных структур факелов распыла соплами разного типа при температуре распыляемой воды 140–260°C и давлении за срезом сопла 0.1 МПа и показана возможность тонкого распыла жидкости (капель воды диаметром 5 мкм и менее, вплоть до субмикронных) при высоких температурах. Установлено, что структура факела распыла носит явно выраженный бимодальный характер: капли диаметром 5–8 мкм сочетаются с субмикронной модой. С ростом температуры распыляемой воды доля субмикронной моды возрастает, достигая 60–65% (по массе) при температуре 240–260°C для цилиндрических сопел и 80–90% для конфузорно-диффузорных сопел. При впрыске воды в компрессор газотурбинной установки (ГТУ) с промышленной турбиной ТВ3-117 продемонстрирована возможность дополнительного регулирования пиковой мощности. Она составляет 4–8% на каждый 1% расхода воды (по отношению к расходу воздуха). Качество регулирования мощности отвечает требованиям сетевых стандартов ЕС России. Технология распыла перегретой воды находит все более широкое применение в практике пожаротушения на объектах энергетики, в замкнутых помещениях, при проливе нефтепродуктов, операциях с сжиженным газом и других ситуациях.

*Ключевые слова:* распыл жидкости, перегретая вода, дисперсная структура факела распыла, бимодальное распределение капель по диаметру, впрыск воды в компрессор ГТУ, взрывное вскипание, обратная задача рассеяния

DOI: 10.56304/S0040363623090084

Конец XX в. ознаменовался впечатляющим прогрессом в энергетическом газотурбостроении. Резко возросли начальные параметры рабочего тела: температура 1550–1600 К, давление 1.5–2.0 МПа. Единичная мощность машин достигла 300–400 МВт, а мощность парогазовых установок (ПГУ) составила 500–600 МВт. Серьезный технический прогресс коснулся и мини-турбин, активно используемых в автономной и распределенной энергетике малых мощностей. Продолжалась активная разработка дополнительных путей и средств повышения экономичности и маневренности турбоагрегатов, таких как регенерация тепла отработанных газов (прежде всего в установках малой мощности) и уменьше-

ние энергии, потребляемой компрессором ГТУ, путем снижения температуры сжимаемого им воздуха. Для реализации последней цели было предложено использовать впрыск воды в тракт компрессора. Испарение инжектируемой воды происходит за счет тепла сжатого воздуха при снижении его температуры [1, 2]. В свою очередь, интенсивность испарения влаги зависит от площади поверхности частиц (капель): чем меньше их размер, тем выше интенсивность испарения.

Известно, что при применении существующих механических и пневматических форсунок не удастся получить капли диаметром менее 10 мкм [3, 4]. Это делало актуальными исследования технологий, которые выглядели достаточно многообещающими в этом плане. Одна из перспективных технологий тонкого распыла жидкости –

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (соглашение ГЗ 075-01129-23-00 от 29.12. 2022).

распыл воды, сильно перегретой относительно температуры насыщения, предложенный голландской фирмой Kema [5] и получивший название swirl flash technology.

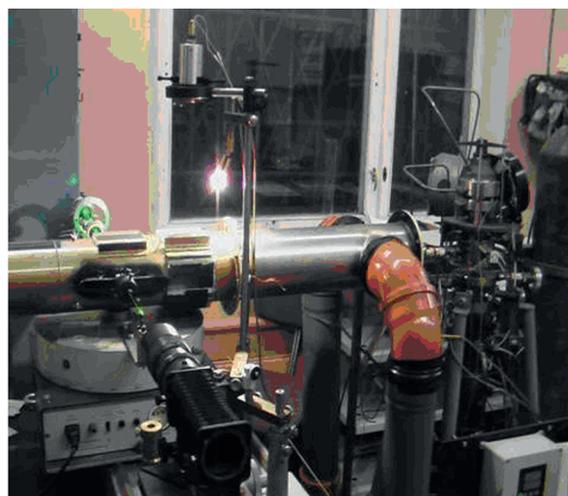
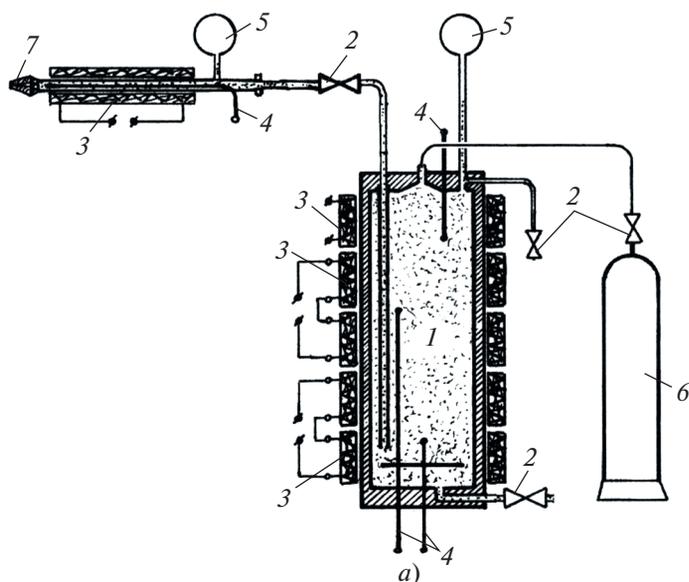
В ОИВТ РАН на протяжении примерно 15 лет проводился комплекс экспериментальных исследований технологии распыла перегретой воды, включавших в себя разработку методов изучения процесса распыла, выбор и отработку способов его диагностики при фрагментации жидкости с помощью форсунок различного типа, изучение характеристик факелов распыла. Технология была реализована на ГТУ с промышленной турбиной мощностью 1.2 МВт. Были разработаны соответствующие рекомендации по ее применению в энергетике с учетом климатических условий России. На нескольких специализированных стендах изучали осаждение капель воды на поверхностях, обтекаемых воздушно-капельным потоком. В процессе исследований был выполнен анализ реализации данной технологии в области пожаротушения и исследована структура вскипающей воды на выходе из ствола пожарной машины, созданной в Академии Государственной противопожарной службы МЧС РФ под научным руководством В.В. Роеенко.

Цель статьи – обобщение опыта исследований механизма вскипания сильно перегретой воды, выполненных в ОИВТ РАН, описание структуры паровоздушно-капельных факелов распыленной воды.

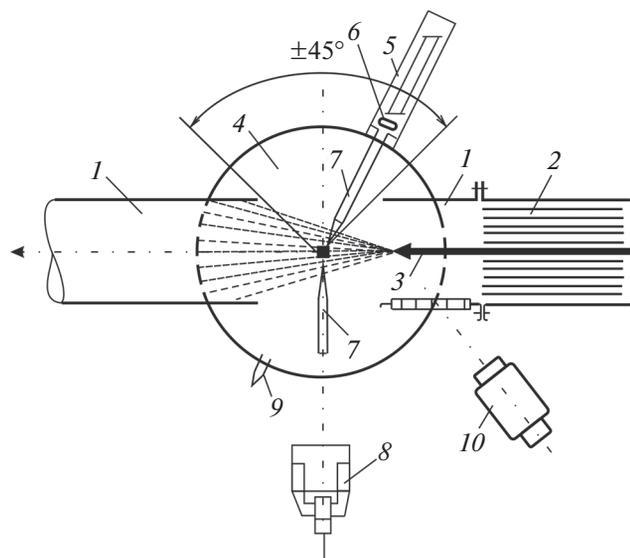
### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ФАКЕЛОВ РАСПЫЛА ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема и внешний вид экспериментального стенда, показанные на рис. 1, подробно описывались в статье авторов [6] и не требуют дополнительных пояснений. Температура воды в опытах изменялась от 20 до 260°C, давление перед форсункой не превышало 6 МПа. Максимальный расход воды через форсунку был равен 30 г/с, максимальная скорость спутного потока воздуха, обтекающего форсунку, составляла 30 м/с, продолжительность опыта – не менее 60 с. Стенд снабжен системой автоматического контроля параметров распыляемой воды и сносящего воздушного потока. На рис. 2 показана схема системы оптической диагностики факела распыла (модернизированный вариант).

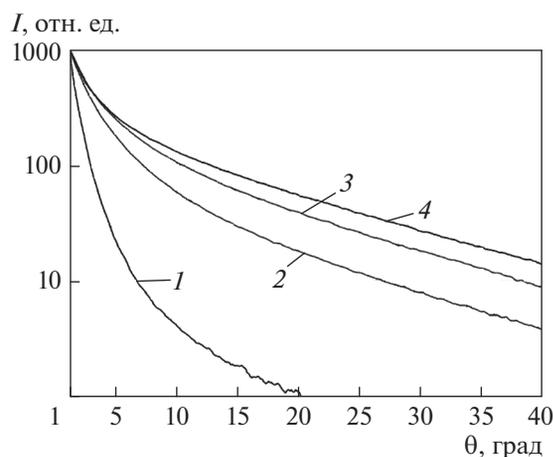
Для определения дисперсного состава факела распыла измеряли индикатрису рассеяния диагностического светового луча в широком диапазоне углов рассеяния ( $\pm 45^\circ$ ), проходящего измерительный объем (в данном случае – лазерный луч длиной волны 532, 650, 808 нм). После этого, используя теорию рассеяния света Ми [7–9], решали обратную задачу рассеяния зондирующего луча и находили искомое распределение частиц по размерам. Этот метод весьма широко используется в экспериментах и инженерной практике, но только на малых углах рассеяния ( $\pm 10^\circ - 15^\circ$ ) [10].



**Рис. 1.** Схема (а) и внешний вид (б) экспериментального стенда.  
1 – автоклав; 2 – запорный вентиль; 3 – нагреватель; 4 – термопара; 5 – датчик давления; 6 – баллон с сжатым воздухом; 7 – форсунка (сопло)



**Рис. 2.** Модернизированная схема оптических измерений с использованием мини-тубусов для оптически плотных факелов распыла перегретой воды. 1 – опытный участок; 2 – воздуховод; 3 – сопло; 4 – поворотный стол; 5 – источник монохроматического излучения; 6 – диафрагма; 7 – конический мини-тубус; 8 – датчик регистрации интенсивности рассеянного излучения; 9 – датчик прямого излучения для регистрации его потерь; 10 – фотокамера



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности рассеянного света  $I$  от угла рассеяния  $\theta$  при различных температурах  $t$  распыляемой воды.  $t$ , °C: 1 – 25; 2 – 170; 3 – 200; 4 – 240

Измерение рассеяния на малых углах, в частности, реализовано в анализаторе размера частиц фирмы Malvern Panalytical. Поскольку после проведенных предварительных опытов в экспериментах авторов ожидалось большое различие в размерах капель распыляемой воды (от субмикронных до 10 мкм), то диапазон измерений индикатрисы рассеяния по углу был существенно расширен.

Созданная система измерений была оттестирована по рассеянию монохроматического луча стандартными водными суспензиями монодисперсных полистироловых сферических частиц диаметром 0.8, 2.0, 5.0 и 10.0 мкм компании Duke Scientific Corp. Для некоторых ситуаций было получено хорошее согласие с показаниями прибора Malvern. Описание деталей методики измерений можно найти в [11]. В ходе экспериментов методика подверглась определенной модернизации. В частности, система измерений была дополнена мини-тубусами, применение которых позволило сократить размеры измерительного объема и степень ослабления диагностического луча в пределах этого объема, а также ослабить влияние вторичного рассеяния [12].

Опыты были проведены с центробежными короткими цилиндрическими соплами диаметром 0.45 и 0.6 мм, а также с конфузorno-диффузорными соплами (угол раскрытия диффузора  $12.5^\circ$ ), имеющими короткую (менее 1 мм) цилиндрическую горловину, напоминающую сопла Лаваля. Эксперименты подтвердили существенное влияние на размер частиц в факеле распыла начальной температуры распыляемой воды. Изменение индикатрисы рассеяния с температурой воды при распылении центробежной форсункой диаметром 0.6 мм и расходом воды 8 г/с показано на рис. 3. Большой интенсивности рассеянного света соответствует среда, содержащая капли меньшего размера.

Влияние начальной температуры начинает проявляться при  $170^\circ\text{C}$ . Количество капель малого диаметра резко увеличивается с ростом температуры (опыты проводились при давлении внешней среды за срезом сопла 0.1 МПа), и при температуре  $240\text{--}270^\circ\text{C}$  доля капель субмикронного размера при распылении через короткие сопла достигает 60–65%. На рис. 4 представлена зависимость содержания капель воды  $n$  от их радиуса  $r_w$  при распылении центробежной форсункой диаметром 0.6 мм на расстоянии 60 мм от среза сопла форсунки.

Второй особенностью распыления перегретой жидкости является получение бимодального спектра частиц (капель), когда мода частиц субмикронного размера сочетается с модой более крупных частиц (5–10 мкм в диаметре). С повышением температуры распыляемой жидкости возрастает доля частиц субмикронного размера. Следует заметить, что размер частиц микронной моды в 2.0–2.5 раза меньше, чем при распылении холодной жидкости, что немаловажно в контексте снижения эрозионного воздействия частиц влаги на элементы конструкции.

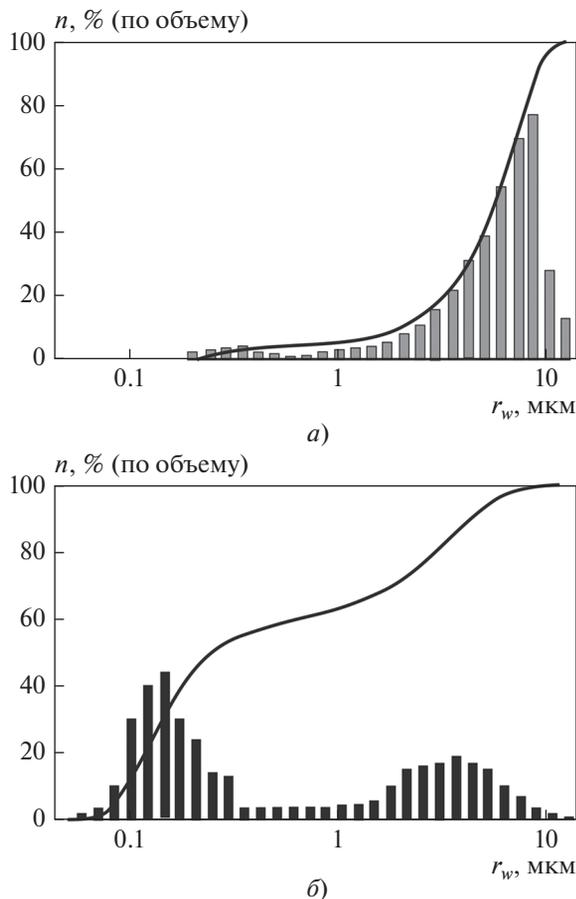


Рис. 4. Распределение капель воды по размерам при температуре 25°C (а) и 240°C (б)

Бимодальное распределение капель при распылении перегретой жидкости было впервые получено в опытах, выполненных в ОИВТ РАН, на коротких соплах благодаря более совершенным методам диагностики. В принципе, его появление не удивительно, так как в рассматриваемой ситуации сочетаются два механизма, реализуемых одновременно: гидродинамическое дробление струи вследствие ее взаимодействия с потоком сносящего воздуха и взрывное вскипание жидкости (flashing), интенсивность которого растет с увеличением температуры [13].

При использовании для распыления перегретой воды конфузорно-диффузорных сопел капли малого (субмикронного) размера образуются в результате взрывного вскипания перегретой жидкости при ее расширении внутри сопла в отсутствие потока сносящего воздуха (рис. 5). Ситуация подобна гомогенному вскипанию перегретой жидкости в объеме. Следуя формально положениям теории гомогенного вскипания с использованием рекомендованного в [14] на основании

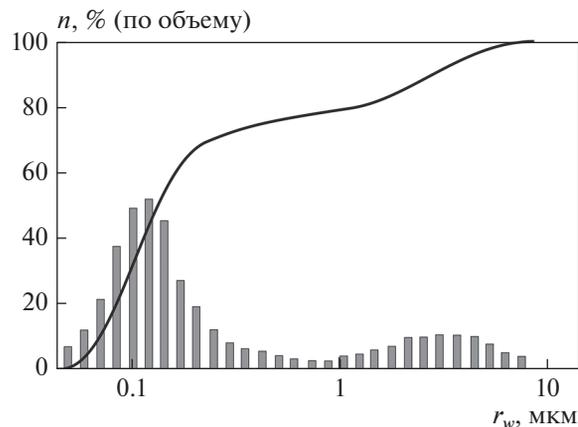


Рис. 5. Экспериментальная зависимость объемной доли капель от их радиуса в факеле распыла через конфузорно-диффузорное сопло при температуре 240°C и давлении 4.0 МПа

большого массива опытных данных фактора гетерогенности около  $10^{-3}$ , учитывающего наблюдаемое в реальности существенное снижение работы образования поверхности пузырьков пара, получили следующий критерий:

$$K = \left(1 - \frac{1}{R}\right) / \ln R,$$

где  $R = p_s/p_l$ ;  $p_s$  – давление насыщения паров жидкости при температуре на входе в форсунку;  $p_l$  – давление жидкости в точке вскипания [15].

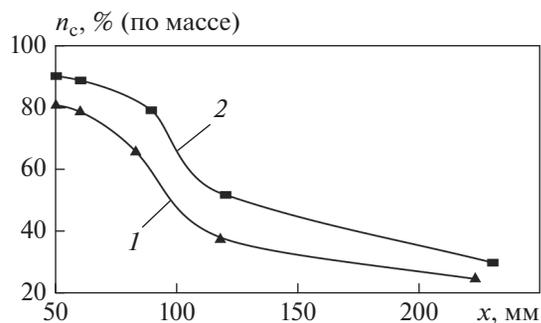
Оценку начала зоны взрывного вскипания можно также получить, используя число Якоба

$$Ja = \rho_l c_l \Delta t / (\rho_v r),$$

где  $\rho_l, c_l, \Delta t$  – плотность, удельная теплоемкость и перегрев жидкости;  $\rho_v, r$  – плотность пара и скрытая теплота парообразования.

Согласно опытам ОИВТ РАН с водой, интенсивное взрывное вскипание (fully flashing) начинается при  $K > 0.6$  [16] и  $Ja > 200$ . Приведенные критерии можно использовать для первичных грубых оценок наличия условий взрывного вскипания, несмотря на весьма нечеткое знание процессов, влияние которых “покрывается” единым поправочным фактором негетогенности, численное значение которого вызывает определенную настороженность.

Для факелов распыления перегретой воды через конфузорно-диффузорные сопла (парокапельные смеси) характерны более высокая концентрация дисперсной фазы [85–70% (по массе)], а также (как показали эксперименты) более тон-



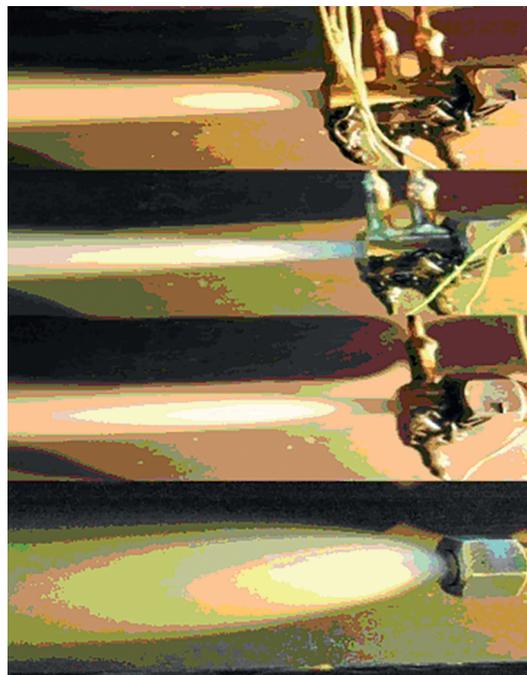
**Рис. 6.** Зависимость доли субмикронной моды капель  $n_c$  (на осевой линии факела распыла перегретой воды) от расстояния от среза сопла  $x$  при температуре 240°C и давлении 4.0 МПа (1) и температуре 260°C и давлении 6.0 МПа (2)

кая дисперсность. При начальной температуре перегретой воды 240 и 265°C достигались массовые доли субмикронной моды капель соответственно 80 и 90% (на расстоянии от среза сопла менее 10 калибров). Для сравнения, при распылении через короткие суживающиеся сопла доля субмикронной моды капель составляет при 240°C не более 65% (по массе). Тем не менее, ожидавшегося в [13] содержания субмикронной моды, близкого к 100% (по массе), в факеле распыла получить не удалось.

Факел распыла через конфузorno-диффузные сопла, как показали опыты, даже в отсутствие спутного потока, в отличие от факела коротких сопел, сохраняет небольшой угол раскрытия.

При диагностике оптически плотных факелов распыла, характерных для конфузorno-диффузных сопел, влияние на результаты анализа может оказывать вторичное многократное рассеяние. Оно особенно существенно на больших углах рассеяния, где сигнал рассеянного луча относительно слаб. В связи с этим при решении обратной задачи определения распределения капель по размерам в факеле распыла по измеряемой в опытах интегральной зависимости относительной интенсивности рассеяния от угла рассеяния в диапазоне  $\pm 45^\circ$  могут появляться заметные погрешности [12]. Во избежание этого было осуществлено несколько модификаций экспериментальной схемы. В частности, была разработана система микротубусов, обеспечивающая постоянство длин диагностирующего и рассеянного лучей лазера при существенном (в несколько раз) их сокращении. Это позволило практически устранить влияние многократного вторичного рассеяния (эти тубусы присутствуют на схеме, приведенной на рис. 2).

Модификация измерительной системы позволила провести исследование распределения мас-



**Рис. 7.** Вид факела распыла перегретой воды в зависимости от длины диффузора

совой доли капель в зависимости от их размера в различных по радиусу зонах факела распыла [17]. Они оказались достаточно близкими. В плотных факелах распыла исследовали также изменение фракционного состава на оси факела в зависимости от расстояния от среза сопла. Опыты [17, 18] показали существенное изменение фракционного состава, в частности значительное уменьшение массовой доли субмикронной моды на расстоянии около 15 калибров (рис. 6).

В ОИВТ РАН проведены экспериментальные исследования распределения температуры, давления и динамических напоров парокapельной смеси вдоль сопла при изменении длины диффузорного участка в целях установления координаты “взрывного” вскипания. Во всех опытах вскипание происходило внутри сопла на расстоянии нескольких миллиметров от его горла (рис. 7). В коротких соплах угол раскрытия факела на выходе из них был несколько больше.

Определение местоположения точки закипания с высокой точностью не обязательно, но если говорить о степени негoмoгенности вскипающей сильно перегретой среды, то этот вопрос достаточно интересен сам по себе.

Была разработана методика расчета параметров двухфазного потока (давления, температуры, массового и объемного паросодержаний) по длине сопла по алгоритму, подобному [19]. Для

описания условий возникновения пузырьков (вскипания жидкости) на первом этапе расчетов пытались использовать подходы, базирующиеся на применении фактора гетерогенности [14]. Этот путь оказался недостаточно продуктивным. При альтернативном подходе при описании объемной гетерогенной нуклеации рассматривается выделение растворенного в перегретой воде воздуха при падении давления в конфузоре [20]. Пузырьки выделившегося воздуха и служат центрами парообразования. Этот подход оказался более эффективным и непротиворечиво коррелирует с результатами экспериментов ОИВТ РАН [20, 21]. Следует заметить, что при описании процесса испарения жидкости использовали методику Лабунцова – Крюкова.

В целом можно сказать, что вопрос корректного описания взрывного вскипания перегретой жидкости в диффузоре пока проработан недостаточно и, соответственно, требует дальнейших исследований для своего разрешения.

#### ВПРЫСК ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В ТРАКТ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Впрыск воды в компрессор ГТУ является важной технической проблемой, к которой эпизодически обращаются ведущие энергомашиностроительные фирмы мира [22–24]. Проще всего впрыск реализуется путем подачи воды на вход в компрессор. Однако в европейской части России, южнее широты Москвы, продолжительность сезона с температурой наружного воздуха выше 10°C составляет всего 3000–4000 ч/год. В остальное время года возникает опасность обледенения входного тракта компрессора и возникновения аварийной ситуации. В Конструкторском бюро промышленных турбин ММП «Салют» (главный конструктор В.Е. Беляев) были разработаны конструкции впрыска воды непосредственно в компрессор машин АЛ-21 и МЭС-60 [25] через спрямляющие лопатки третьей–пятой ступеней и ротор компрессора и начато освоение этих машин. К сожалению, инновационные работы по МЭС-60 были прерваны, а сама установка демонтирована.

Тем не менее, в ОИВТ РАН работы по впрыску воды в компрессор были продолжены на ГТУ с промышленной турбиной ТВ3-117 мощностью 1.2 МВт Завода им. В.Я. Климova [26]. Опыты показали прирост мощности ГТУ на 4–8% на каждый 1% расхода воды (по отношению к расходу воздуха) при неизменной температуре на входе в турбину. Тем самым появляется дополнительная возможность регулирования мощности

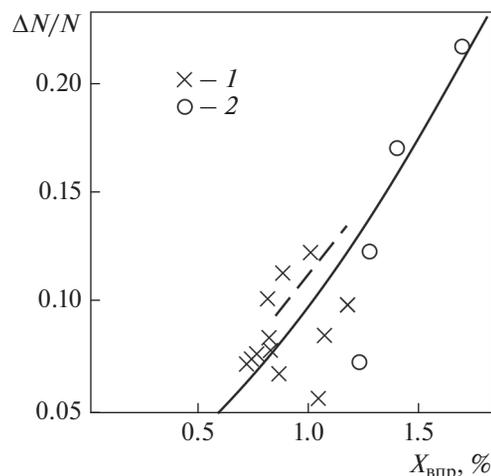


Рис. 8. Зависимость прироста мощности  $\Delta N/N$  ГТУ с турбиной ТВ3-117 от доли впрыскиваемой на вход в компрессор воды (относительно расхода воздуха через компрессор)  $X_{впр}$ ,  $t, ^\circ\text{C}$ : 1 – 220–240; 2 – 20

турбины, при этом качество регулирования мощности отвечает требованиям нормированного первичного и автоматического вторичного регулирования частоты установки [27]. Прирост мощности ГТУ при впрыске воды в компрессор иллюстрирует рис. 8.

Основной вклад в прирост мощности дает увеличение расхода рабочего тела в результате испарения инжестируемой воды и образования водяного пара. Удельная работа сжатия рабочего тела уменьшается из-за снижения температуры. Однако суммарная мощность, потребляемая компрессором, остается примерно той же – снижение удельной работы сжатия нивелируется расходом энергии на сжатие образовавшегося пара и испарение воды. В камеру сгорания ГТУ подводится дополнительное тепло. В итоге КПД при выработке установкой полезной работы остается примерно тем же.

Конечно, остается проблема эрозионного износа лопаточного аппарата компрессора [24], но она становится менее острой, так как интенсивность износа снижается пропорционально диаметру в кубе крупных фракций влаги с его уменьшением, а при распыле перегретой воды, как уже отмечалось, диаметр действительно уменьшается. При распыле перегретой воды сокращается и сама доля крупных фракций. Тем не менее, вопрос остается неоднозначным, и, скорее всего, впрыск целесообразно использовать для регулирования пиковых нагрузок системы.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В ПРАКТИКЕ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Технология распыла перегретой воды находит все более широкое применение в практике пожаротушения на объектах энергетики и судах, в замкнутых помещениях, при проливе нефтепродуктов, операциях с сжиженным газом и в ряде других ситуаций [28–30]. Применяя то или иное гасящее пламя вещество, обычно ставят несколько задач: охладить горящий объект, изолировать его от поступления новых порций окислителя (воздуха), разбавить среду около горящего объекта инертной компонентой. Одновременно ставится задача создать тепловую завесу между горящим и соседними объектами. Выходящая из пожарного ствола паровая струя с каплями мелкодисперсной воды в большой степени отвечает решению этих задач. Наличие испаряющихся капель воды малого размера образует множество интенсивных стоков тепла, водяной пар блокирует поступление свежих порций кислорода и создает инертную среду. Парокапельная завеса отражает и рассеивает поток излучения к окружающим объектам. Используя распыл нагретой до 250°C воды, в Академии ГПС МЧС России разработали (руководитель работ В.В. Роечко) пожарно-спасательный автомобиль с установкой пожаротушения “температурно-активированной” (терминология авторов изделия) водой, который был принят в эксплуатацию. ОИВТ РАН принимал участие в этих работах в ограниченных масштабах (определена дисперсионная структура круглых и плоских факелов распыла, образующихся на выходе из стволов систем пожаротушения). В Академии ГПС МЧС России были разработаны также установки объемного тушения парокапельной средой для закрытых помещений, в том числе объектов энергетики. Разработаны технологии тушения проливов нефти и нефтепродуктов. Это работы большой значимости.

### ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование процесса фрагментации воды, сильно перегретой относительно температуры насыщения, при ее истечении через форсунки различного типа. Создана экспериментальная установка, разработана и отлажена система оптических измерений дисперсионной структуры факела распыла. Она базируется на измерении индикатрисы рассеяния зондирующего лазерного излучения в широком диапазоне углов ( $\pm 45^\circ$ ) и решении обратной задачи рассеяния с помощью теории Ми.

2. При применении цилиндрических, центробежных и расходящихся конических (конфузор-

но-диффузорных) сопел достигается получение тонкого распыла (капель воды диаметром 5 мкм и менее, вплоть до субмикронных) в диапазоне температур 140–260°C (при давлении за срезом сопел 0.1 МПа).

3. Структура факела распыла носит явно выраженный бимодальный характер: капли диаметром 5–8 мкм сочетаются с субмикронной модой. С ростом температуры распыла доля субмикронной моды возрастает, достигая 60–65% при 240–260°C для цилиндрических сопел и 80–85% для конфузорно-диффузорных сопел.

4. Наличие двух мод размеров капель, по-видимому, обусловлено сочетанием при распыле перегретой жидкости процесса взрывного ее вскипания (flashing) с обычным гидродинамическим разрывом струй и пленок жидкости при их взаимодействии с воздушным потоком.

5. При впрыске воды в компрессор промышленной турбины ТВ3-117 обеспечивается возможность дополнительно увеличить мощность ГТУ на 4–8% на каждый 1% расхода воды (по отношению к расходу воздуха). Качество регулирования мощности отвечает требованиям сетевых стандартов ЕС России. Его целесообразно применять при регулировании пиковых нагрузок.

6. Технология распыла перегретой воды находит все более широкое применение в практике пожаротушения на объектах энергетики, в замкнутых помещениях, при проливе нефтепродуктов, при операциях с сжиженным газом и в ряде других ситуаций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jonsson M., Yan J.** Humidified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles // *Energy*. 2005. V. 30. P. 1013–1078.
2. **Арсеньев Л.В., Беркович А.Л.** Параметры газотурбинных установок с впрыском воды в компрессор // *Теплоэнергетика*. 1996. № 4. С. 18–22.
3. **Раушенбах Б.В.** Физические основы процесса в камерах сгорания ВРД. М.: Машиностроение, 1964.
4. **Chacker M., Meher C.B., Mee T.** Inlet fogging of gas turbine engines. Part 2: Fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement and testing // *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*. 2004. V. 126. No. 3. P. 550–570.
5. **The TopHat turbine cycle** / *Modern Power Systems* // *Gas Turbine Technologies*. Apr. 2001. P. 35–37. <https://www.modernpowersystems.com/features/featurethe-tophat-turbine-cycle/>
6. **Распыление** перегретой воды: результаты экспериментальных исследований / Л.А. Домбровский, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, Д.В. Мариничев, В.Л. Низовский, А.А. Оксман, К.А. Ходаков // *Теплоэнергетика*. 2009. № 3. С. 12–20.

7. **Dombrovsky L.A.** Radiation heat transfer in disperse systems. N.Y.: Begell House, 1996.
8. **Van de Hulst H.C.** Light scattering by small particles. N.Y.: Dover Publications, 1981.
9. **Bohren C.F., Huffman D.R.** Absorption and scattering of light by small particles. Chichester: Wiley Science Paperback Series, 1998.
10. **Шифрин К.С.** Существенная область углов рассеяния при измерении распределения частиц по размерам методом малых углов // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 11. № 9. С. 928–932.
11. **Мариничев Д.М.** Экспериментальное исследование тонкодисперсного распыла перегретой воды: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013.
12. **Dumouchell C., Yangyingsakthavorn P., Cousin J.** Light multiple scattering correction of laser-diffraction spray drop-size distribution measurements // Int. J. Multiphase Flow. 2009. V. 35. P. 277–287.
13. **О природе** бимодального распределения капель по размерам при распыле перегретой воды / В.Б. Алексеев, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, Д.В. Мариничев, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский // ТВТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 221–224.
14. **Кумзерова Е.Ю.** Численное исследование образования и роста пузырей пара в условиях падения давления жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2012.
15. **Some peculiarities of superheated water flow in contracting-expanding nozzles and their influence on droplet dimension distribution in an atomized water plume / V.I. Zalkind, Yu. A. Zeigarnik, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Schigel // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1359. P. 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012034>**
16. **Features of metastable superheated water atomization when being discharged through convergent-divergent nozzles at different superheat values / V.I. Zalkind, Yu. A. Zeigarnik, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Schigel // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2088. Is. 1. P. 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2088/1/012054>**
17. **Specific features of evolution of dense atomized superheated water plumes and peculiarities of its diagnostics / V.I. Zalkind, Yu. A. Zeigarnik, V.L. Nizovskiy, L.V. Nizovskiy, S.S. Schigel // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2057. Is. 1. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012045>**
18. **Исследование** распыла перегретой воды через расширяющееся сопло: Тезисы докл. / В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский, С.С. Шигель // VII Всерос. науч. конф. “Теплофизика и физическая гидродинамика”. Сочи, 5–14 сентября 2022 г. Новосибирск: ИТТФ, 2022.
19. **Kedrinsrii V.K.** The Iordansky-Kogarko – van Wijn-gaarden model: shock and refraction wave interactions in Bubby Media // Appl. Sci. Res. 1998. V. 58. P. 115–130. <https://doi.org/10.1023/A:1000761931688>
20. **Исследование** распыла перегретой воды в конфузочно-диффузоре; особенности гетерогенной нуклеации / В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский, С.С. Шигель // Материалы Восьмой Рос. нац. конф. по теплообмену (РНКТ-8). Москва, 17–22 окт. 2022 г. М.: Изд-во МЭИ, 2022. Т. 1. С. 413–414.
21. **Сравнение** моделей гетерогенной нуклеации при вскипании перегретой воды в конфузочно-диффузоре сопла: Тезисы докл. / В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский, С.С. Шигель // VII Всерос. науч. конф. “Теплофизика и физическая гидродинамика”. Сочи, 5–14 сентября 2022 г. Новосибирск: ИТТФ, 2022.
22. **Crampsie S.** Wet compression boost for power output and efficiency // Gas Turbine World. 2012. March–April.
23. **A study of performance on advanced humid air turbine systems / S. Higuchi, S. Hatamiya, N. Seiki, S. Marushima // Proc. of the Intern. Gas Turbine Congress. Tokyo, 2–7 Nov. 2003.**
24. **Inlet fogging and overspray impact on industrial gas turbine life and performance / K. Brun, R. Kurtz, M. Nored, J. Thorp // Proc. of the 2nd Middle East Turbomachinery Symp. Doha, Qatar, 17–20 March 2013.**
25. **Комплексная** парогазовая установка с впрыском пара и теплонасосной установкой (ПГУМЭС-60) для АО “Мосэнерго” / О.Н. Фаворский, В.М. Батенин, В.Е. Беляев, В.Ю. Васютинский, И.Т. Горюнов, Ю.С. Елисеев, Ю.А. Зейгарник, А.С. Косой, В.М. Масленников, А.К. Маханьков, С.И. Пищиков, А.Н. Ремезов, М.В. Синкевич, Ю.Н. Соколов // Теплоэнергетика. 2001. № 9. С. 50–58.
26. **Экспериментальное** исследование характеристик газотурбинной установки ТВ3-117 при впрыске перегретой воды в компрессор / О.Н. Фаворский, В.Б. Алексеев, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, П.П. Иванов, Д.В. Мариничев, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 60–68. <https://doi.org/10.1134/S0040363614050026>
27. **СТО СО-ЦДУ ЕЭС 001-2005.** Нормы участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты. М.: СО-ЦДУ ЕЭС, 2005.
28. **Пряничников А.В., Роеенко В.В., Бондарев Е.Б.** Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными парокпельными струями // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация. 2015. № 4. С. 7–12.
29. **Роеенко В.В., Пряничников А.В., Бондарев Е.Б.** Применение температурно-активированной воды для тушения турбинных масел на объектах энергетики // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 84–93.
30. **Ищенко А.Д., Роеенко В.В., Малыгин И.Г.** Эксперименты тушения пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) водной средней объемным способом // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 3 (41). С. 128–133.

## An Integrated Study of Superheated Water Atomization

Yu. A. Zeigarnik<sup>a</sup>, V. I. Zalkind<sup>a</sup>, V. L. Nizovskii<sup>a</sup>, L. V. Nizovskii<sup>a</sup>,  
S. S. Shchigel'<sup>a</sup>, and I. V. Maslakova<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

\*e-mail: i.v.maslakova@yandex.ru

**Abstract**—The article presents the results obtained from an integrated study of heavily superheated water atomization during its flowing out through various types of atomizers. A system for optic measurements of the spray cone dispersion structure has been developed and adjusted. The developed measurement system is based on measuring the scattering indicatrix of a probing laser emission in a wide range of angles ( $\pm 45^\circ$ ) and solving the inverse scattering problem using the Mie theory. The results from a wide-scale experimental study of the spray cone dispersion structures produced by various types of nozzles with a sprayed water temperature of 140–260°C and pressure at the nozzle exit equal to 0.1 MPa are presented, and the possibility of liquid atomization (to water droplets with a diameter of 5  $\mu\text{m}$  or smaller down to submicrometer size) at high temperatures is shown. It has been found that the spray cone structure has a pronounced bimodal pattern: droplets 5–8  $\mu\text{m}$  in diameter combine with a submicrometer mode. With a growth of atomized water temperature, the fraction of submicrometer mode increases, reaching 60–65 wt % at a temperature of 240–260°C for cylindrical nozzles and 80–90 wt % for convergent-divergent nozzles. For the case of water injection into the compressor of a gas turbine unit equipped with the TV-117 industrial grade turbine, the possibility of additionally controlling the peak power output has been demonstrated. It makes 4–8% per water flowrate percent (with respect to the air flowrate). The power output control quality is in compliance with the requirements of the UES of Russia network standards. Superheated water is finding an increasingly growing use for firefighting at power industry facilities, in closed premises, in spills of petroleum products, in performing operations with liquefied gas, and in other situations.

*Keywords:* liquid atomization, superheated water, spray cone dispersed structure, bimodal distribution of droplet diameters, water injection into the GTU compressor, flashing, inverse scattering problem