

УДК 536.715

## Распыл метастабильной перегретой воды: некоторые результаты экспериментальных исследований\*

В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, В.Л. Низовский,  
Л.В. Низовский, С.С. Щигель

Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, 125412, Россия  
e-mail: levmobile@mail.ru

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-290-295

Поступила в редакцию 28.05.2021

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 19.06.2021

Выполнено экспериментальное исследование распыла метастабильной перегретой воды при ее истечении в атмосферу из цилиндрического и диффузорно-конфузорного сопел при температурах распыла 170–260°C. Показано, что структура факела распыла имеет бимодальный вид с преобладанием капель субмикронного диаметра, доля которых увеличивается с температурой и достигает 80% на выходе из конфузорно-диффузорного сопла при температуре воды 260°C. Отработана методика измерений с применением микротубусов для минимизации длины пути диагностического лазерного луча и снижения степени его поглощения и многократного рассеяния массивом тонко диспергированных капель. Выполнены оценки степени влияния коагуляции капель на изменение доли капель крупного размера по длине факела распыла.

**Ключевые слова:** тонкодисперсный распыл, перегретая метастабильная вода.

### Введение

Распыл (диспергирование) составляет основу ряда технологических процессов [1]. Он может также использоваться в энергетике при впрыске воды в компрессор газотурбинной установки (ГТУ) для повышения ее мощности и маневренности [2], в пожарном деле при тушении горящих нефтепродуктов, гашении пожаров в стесненных и сильно задымленных условиях [3], при создании экранирующей пламя пожара завесы [4]. Диаметр капель распыла холодной воды при использовании центробежных или прямоточных (цилиндрических) форсунок обычно лежит в пределах

10–15 мкм и более. Для получения более тонкого распыла, необходимого для эффективно-го испарения воды в тракте компрессора или создания парокapельной завесы приходится изыскивать дополнительные средства фрагментации жидкости. К их числу относится фрагментация метастабильной перегретой жидкости, резко вскипающей в процессе снижения давления в распыливающем устройстве и дробящей исходную структуру (струю) на тонкие фрагменты. В ОИВТ РАН, Институте теплофизики УРО РАН и ряде других научных центров были проведены исследования процесса фрагментации перегретой воды [5–7], причем в ОИВТ РАН акцент делался на исследовании условий достижения тонкой фрагментации, анализе дисперсного состава и структуры факела распыла.

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00504).

## Экспериментальная установка и методика эксперимента

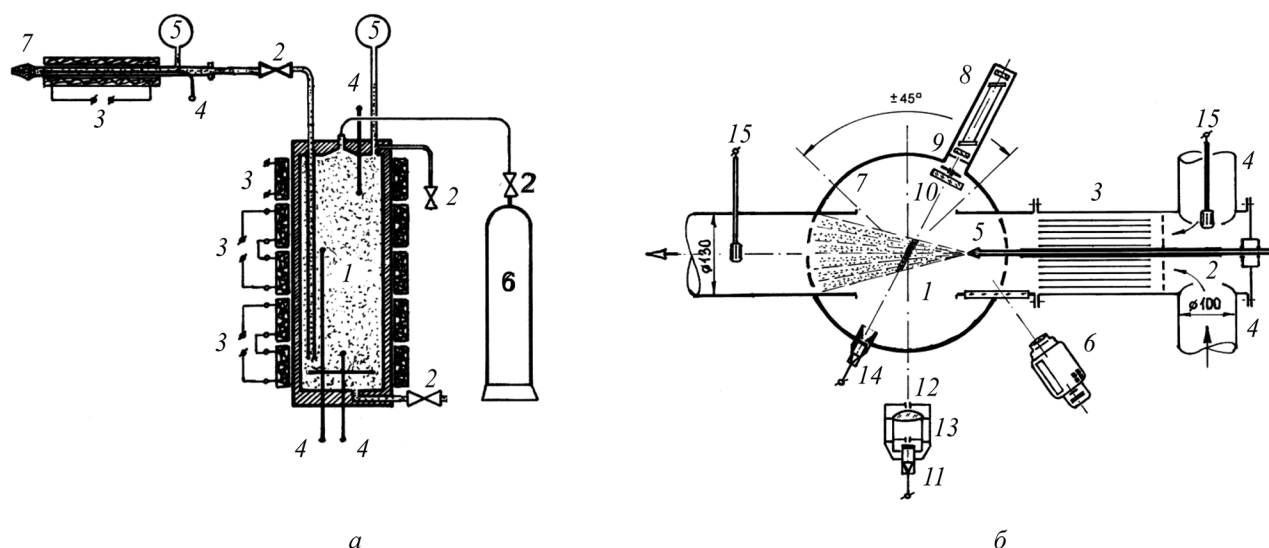
Эксперименты ОИВТ РАН проводились на установке «Распыл». Ее схема и эскиз рабочего участка приведены на рис. 1.

Установка позволяет исследовать распыл воды, имеющей температуру до  $240^{\circ}\text{C}$ , и использовать различного типа форсунки в условиях сносящего воздушного потока. Для определения дисперсного состава образующегося факела капель воды использовался метод рассеяния исследуемым факелом диагностирующего монохроматического луча и анализ индикатрис рассеяния, полученных в широком диапазоне углов рассеяния ( $\pm 45^{\circ}$ ). В основе методики обработки индикатрис рассеяния лежало решение обратной задачи рассеяния света, базирующееся на положениях теории Ми. Детали методики описаны в [8]. Опыты были проведены с перегретой водой, истекающей из центробежной форсунки, прямооточного (короткое цилиндрическое сопло) и конфузорно-диффузорного сопел в спутный поток воздуха. Начальное давление воды перед распылом – 8 МПа.

## Результаты экспериментов

Эксперименты показали существенное снижение максимального размера капель по сравнению со случаем распыла холодной воды (диаметр наиболее крупных капель воды был около 10 мкм) и преобладание в образующемся факеле капель субмикронного (диаметром 1 мкм и менее) размера. При увеличении температуры фрагментируемой воды со  $170$  до  $240^{\circ}\text{C}$  доля капель субмикронного размера возрастала с 40 до 65% (цилиндрическое сопло) [5]. В последующем было показано, что при дальнейшем увеличении температуры воды до  $260^{\circ}\text{C}$  доля капель субмикронного размера возрастает еще более, доходя в диффузорном сопле до 75–80%. Эффективность ввода тонко диспергированной влаги была продемонстрирована испытаниями промышленной турбины ТВ-3-117 мощностью 1.2 МВт [2].

На рис. 2 показаны типичные для распыла перегретой воды бимодальные распределения капель по размерам. Оно, по-видимому, является результатом взаимодействия двух механизмов процесса фрагментации жидкости: обычно газодинамического дробления струи и ее



**Рис. 1.** Схема установки (а) и эскиз рабочего участка и системы регистрации излучения (б). а: 1 – автоклав; 2 – запорные вентили; 3 – нагреватели; 4 – датчики температуры (термопары хромель-капель); 5 – датчики давления; 6 – баллон с сжатым воздухом; 7 – форсунка (сопло); 8 – источник монохроматического излучения; 9 – ограничительная диафрагма; 10 – ослабляющий нейтральный светофильтр; 11 – устройство регистрации интенсивности рассеянного излучения; 12 – апертурная диафрагма; 13 – объектив; 14 – регистрирующее устройство ослабленного прямого излучения; 15 – датчики влажности и температуры

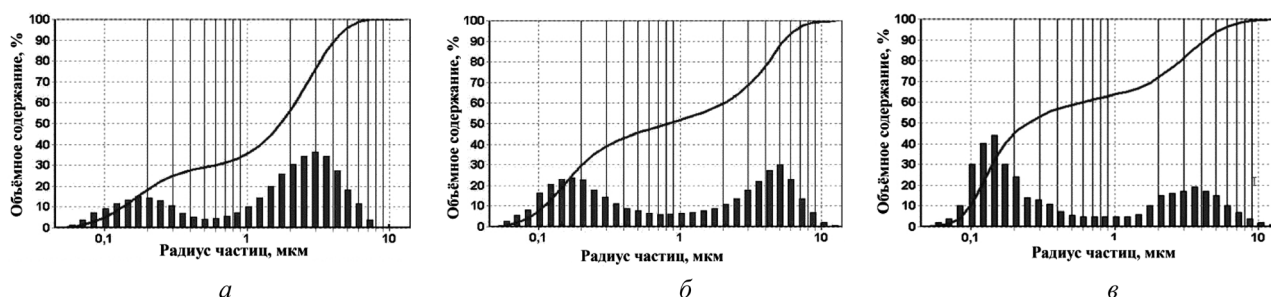


Рис. 2. Бимодальные распределения капель распыла перегретой воды: *a* –  $T=170^{\circ}\text{C}$ ; *b* –  $200^{\circ}\text{C}$ ; *v* –  $240^{\circ}\text{C}$ . Цилиндрическое сопло. Кривые – суммарная доля капель малого размера

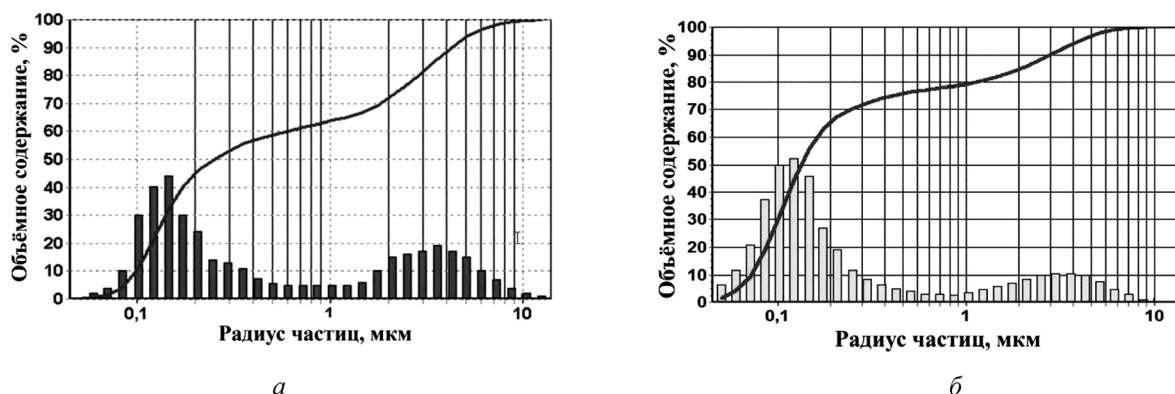


Рис. 3. Распределение капель по размерам для разных типов сопел: *a* – короткое цилиндрическое сопло; *b* – конфузорно-диффузорное сопло.  $T = 240^{\circ}\text{C}$ . Кривые – суммарная доля капель малого размера

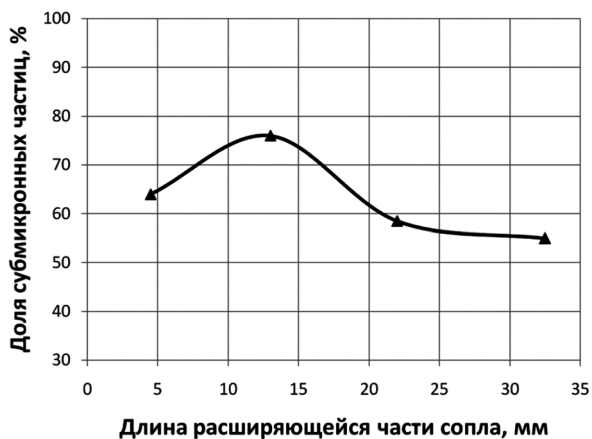


Рис. 4. Зависимость количества субмикронной доли капель от длины сопла

распыла в результате вскипания с образованием множества паровых пузырьков в истекающей из сопла струе жидкости (flashing) [9].

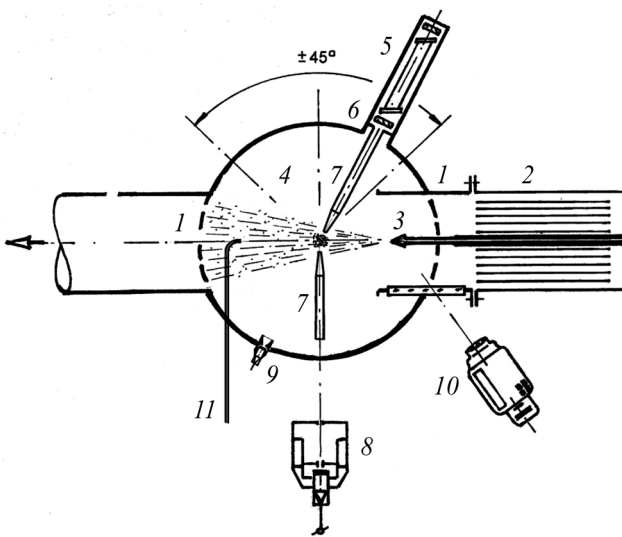
Была предпринята попытка улучшить типичную бимодальную структуру факела распыла (увеличить долю капель субмикронного размера) изменением формы сопла, перейдя от короткого цилиндрического сопла к соплу диффузорного типа с малым углом раскрытия

( $12-16^{\circ}$ ), преследуя цель создать условия для опережающего действия взрывного вскипания, которое согласно расчетам и экспериментам происходит непосредственно на выходе из горловины сопла. Эти надежды оправдались, хотя и в неполной мере. Полностью избавиться от капель микронного размера не удалось, но доля капель субмикронного размера при  $T = 240^{\circ}\text{C}$  выросла на 5–10% абс. (рис. 3).

Изменение длины сопла слабо влияло на распределение капель по размерам. (рис. 4).

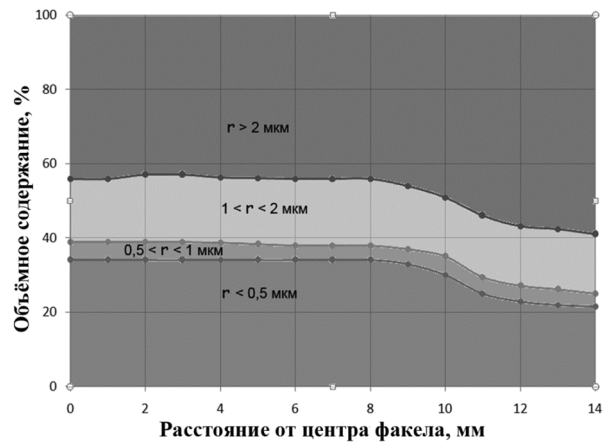
Основным фактором, определяющим дисперсионную характеристику факела, оставалась температура жидкости на входе в сопло. При этом еще раз подчеркнем, что максимальный размер капель в факеле распыла перегретой воды все же в несколько раз меньше, чем при распыле холодной жидкости, что существенно облегчает решение многих побочных проблем, таких, как эрозия лопаток в ГТУ.

Известно, что при экспериментах большая длина диагностируемого участка факела и высокая концентрация капель в нем вносят искажения в результаты измерений [10], что связано как с поглощением, так и с многократным рас-



**Рис. 5.** Схема измерений с мини-тубусами: 1 – рабочий участок – труба диаметром 130 и длиной 1500 мм; 2 – входное спрямляющее устройство; 3 – форсунка; 4 – поворотный стол; 5 – источник монохроматического излучения; 6 – ограничительная диафрагма; 7 – тубусы с профилированными наконечниками; 8 – устройство регистрации интенсивности рассеянного излучения; 9 – регистрирующее устройство ослабленного прямого излучения; 10 – фотоаппарат; 11 – приемник динамического напора

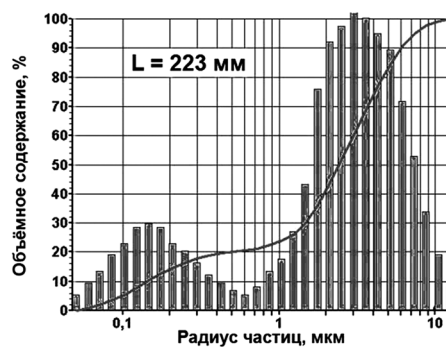
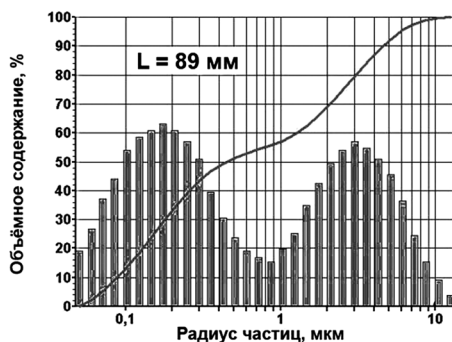
сеянием диагностирующего луча, не учитываемого теорией Ми, на которую опирается обработка результатов измерений. В этой связи установка была модифицирована и измерения проводились с использованием специальных мини-тубусов (световодов), существенно уменьшивших длину пути диагностирующего луча в факеле распыла (рис. 5). Коэффициент ослабления интенсивности монохроматического луча на участке измерения после установки мини-тубусов снижается многократно до приемлемых значений 4–5. Особенно существенно ослабление луча сказывается при диагностиро-



**Рис. 6.** Изменение состава факела по сечению

вании потока за диффузорным соплом, где концентрация капель в среде образовавшегося пара намного выше, чем за коротким цилиндрическим соплом, из-за отсутствия интенсивного смешения со спутным потоком воздуха.

Выполненные с использованием мини-тубусов измерения дисперсионной структуры факелов распыла перегретой воды на выходе из конфузорно-диффузорных сопел позволили получить надежные результаты. Они, как уже говорилось выше, оказались близки к полученным ранее на цилиндрических соплах, размещенных в спутной воздушной струе (при одинаковой температуре распыливаемой воды доля субмикронных капель увеличилась примерно на 10%). Используя мини-тубусы, оказалось возможным измерить распределение дисперсионной структуры факела по его поперечному сечению. Оно изменялось слабо (рис. 6) в отличие от изменения структуры факела по длине, которое оказалось более существенным (рис. 7) – доля крупных капель (микронного



**Рис. 7.** Изменение состава факела с увеличением расстояния от среза сопла.  $T = 240^{\circ}\text{C}$ . Кривые – суммарная доля капель малого размера

размера) возросла примерно на 40% (абс.) на участке длиной 130 мм (примерно 25 калибров, считая по диаметру отверстия на срезе сопла).

Капли микронного и субмикронного диаметров имеют разную скорость движения, также по-разному меняется их скорость в условиях взаимодействия паро-капельной струи, истекающей из сопла, со спутным воздушным потоком. Выполнена оценка степени влияния коагуляции (слияния) капель микронного и субмикронного размеров на изменение дисперсионной структуры факела по длине в условиях проведенных экспериментов. Влияние броуновской коагуляции оказалось пренебрежимо малым. Заметно больший вклад дает турбулентная коагуляция. Она рассчитывалась согласно [11] в условиях допущения максимального уровня турбулентности в свободной струе [12]. Вклад этого типа коагуляции, однако, также оказался невелик. Была разработана методика и выполнены расчеты инерционной коагуляции, обусловленной различием скоростей и ускорений капель разного размера. Эффект этого типа коагуляции оказался наибольшим. Но все виды коагуляции в совокупности все же не «обеспечивают» наблюдаемого в экспериментах роста доли капель микронного размера. Вопрос требует дальнейшего анализа.

### Заключение

Распыл метастабильной перегретой жидкости обеспечивает существенное снижение размеров диспергируемой среды, что существенно для реализации ряда технологических процессов.

Факел распыла перегретой жидкости имеет бимодальную структуру. Доля капель субмикронного размера увеличивается с ростом температуры распыла, достигая при распыле перегретой до 260°C воды 80%.

Применение сопел с диффузорной выходной частью (угол раскрытия ~12–16°) примерно на 10% (абс.) увеличивает долю капель субмикронного размера. Дисперсионная структура факела распыла практически не меняется по радиусу факела; доля капель микронного размера возрастает по длине факела распыла.

Применение мини-тубусов позволяет повысить точность определения дисперсионных

характеристик факелов распыла, сокращая длину зоны измерений и снижая поглощение и многократное рассеяние диагностирующего луча.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова И.В., Гильмутдинов И.И., Гильмутдинов И.М., Сабирзянов А.Н. Получение наночастиц лидокаина методом быстрого расширения сверхкритического раствора в водную среду // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 5. С. 764–768.
2. Фаворский О.Н., Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Иванов П.П., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. Экспериментальное исследование характеристик газотурбинной установки ТВЗ-117 при впрыске перегретой воды в компрессор // Теплоэнергетика. 2014. № 5. С. 60–68.
3. Пряничников А.В., Роевко В.В., Бондарев Е.Б. Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными парокпельными струями воды // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2015. № 4. С. 7–12.
4. Dombrovsky L.A., Dembele S., Wen X.J. A Simplified Model for The Shielding of Fire Thermal Radiation by Water Mists // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Т. 96. Р. 199–209.
5. Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. Распыление перегретой воды: практика исследования сложных дисперсионных структур // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 3. С. 456.
6. Решетников А.В., Роевко В.В., Мажейко Н.А. и др. Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. № 7. С. 295–302.
7. Lamanna G., Kamoun H., Weigand V., Steelant J. Towards a Unified Treatment of Fully Flashing Sprays // International Journal of Multiphase Flow. 2014. V. 58(2014). P. 168–184.
8. Домбровский Л.А., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Оксман А.А., Ходаков К.А. Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 12–20.
9. Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. О природе бимодального распределения капель по размерам при распыле перегретой воды // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 2. С. 221–224.
10. Dumouchel C., Yangyingsakthavorn P., Cousin J. Light Multiple Scattering Correction of Laser-Diffraction Spray Drop-Size Distribution Measurements // Int. J. of Multiphase Flow. 2009. V. 35. P. 277–287.
11. Алипченков В.М., Зайчик Л.И., Зейгарник Ю.А. Разработка трехжидкостной модели двухфазного потока для дисперсно-кольцевого течения в каналах. М.: Препринт ИВТАН и ОЦ МАЭ РФ, 2001. 53 с.
12. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 826 с.

## Metastable overheated water atomization: certain results of experimental studies

V.I. Zalkind, Yu.A. Zeigarnik, V.L. Nizovskii, L.V. Nizovskii, S.S. Shchigel

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412, Russia  
e-mail: levmobile@mail.ru

Experimental study of metastable overheated water atomizing while its discharge into atmosphere from cylindrical and convergent-divergent nozzles at the temperature of 200–260°C was accomplished. The article demonstrates that an atomized plume has a bimodal structure with a submicron fraction being dominated, which share is increased with temperature and achieved 80% at the convergent-divergent nozzle outlet at the water temperature of 260°C. The measuring technique employing micro-tubes (optical guides) to minimize the diagnostic laser beam length, and reduce its absorption and multiple scattering intensity by mass of finely dispersed droplets was developed. Evaluations of droplets coagulation degree impact on the droplets share changing along the atomization plume length was estimated.

**Keywords:** finely dispersed atomization, overheated metastable water.

### REFERENCES

1. **Kuznetsova I.V., Gilmutdinov I.I., Gilmutdinov I.M., Sabirzyanov A.N.** Poluchenie nanoform lidokaina metodom bystrogo rasshireniya sverkhkriticheskogo rastvora v vodnuyu sredu [Production of Lidocaine Nanoforms via the Rapid Extension of a Supercritical Solution into Water Medium] // *Teplofizika vysokikh temperatur – High Temperature*, 2019, vol. 57, no. 5, pp. 726–730. In Russ.
2. **Favorskii O.N., Alekseev V.B., Zalkind V.I., Zeigarnik Yu.A., Ivanov P.P., Marinichev D.V., Nizovskii V.L., Nizovskii L.V.** Eksperimental'noe issledovanie kharakteristik gazoturbinnoy ustanovki TV3-117 pri vpryske peregretoy vody v compressor [Experimentally Studying TV3-117 Gas-Turbine Unit Characteristics at Superheated Water Injection into a Compressor] // *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 5, pp. 376–384. In Russ.
3. **Pryanichnikov A.V., Roenko V.V., Bondarev E.B.** Tushenie prolivov nefli i nefteproduktov metastabil'nymi parokapel'nymi struyami vody [Extinguishing Spills of Oil and Oil Products with Metastable Water Fog] // *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya – Fire and emergencies: prevention, elimination*, 2015, no. 4, pp. 7–12. In Russ.
4. **Dombrovskiy L.A., Dembele S., Wen X.J.** A Simplified Model for The Shielding of Fire Thermal Radiation by Water Mists // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 96, pp. 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028>
5. **Alekseev V.B., Zalkind V.I., Zeigarnik Y.A., Marinichev D.V., Nizovskii V.L., Nizovskii L.V.** Raspylenie peregretoy vody: praktika issledovaniya slozhnykh disperсионnykh struktur [Atomization of superheated water: practice of investigation of complicated disperse systems] // *Teplofizika vysokikh temperatur – High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 441–446. In Russ.
6. **Reshetnikov A.V., Roenko V.V., Majeyko N.A.** Vzryvnoe vskipanie i polnyy razval strui peregretoy vody [Explosive Boiling and Complete Collapse of the Superheated Water Jet Thermal Processes in Engineering] // *Teplovyie protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2013, vol. 5, no. 7, pp. 295–302. In Russ.
7. **Lamanna G., Kamoun H., Weigand B., Steelant J.** Towards a Unified Treatment of Fully Flashing Sprays // *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, vol. 58, pp. 168–184. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.08.010
8. **Dombrovskii L.A., Zalkind V.I., Zeigarnik Yu.A., Marinichev D.V., Nizovskii V.L., Oksman A.A., Khodakov K.A.** Raspylenie peregretoy vody: rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy [Atomization of Superheated Water: Results from Experimental Studies] // *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 3, pp. 191–200. In Russ.
9. **Alekseev V.B., Zalkind V.I., Zeigarnik Y.A., Marinichev D.V., Nizovskii V.L., Nizovskii L.V.** O prirode bimodal'nogo raspredeleniya kapel' po razmeram pri raspyle peregretoy vody [On the Nature of Bimodal Drop Distribution over Sizes under Superheated Water Atomization] // *Teplofizika vysokikh temperatur – High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 221–224. In Russ.
10. **Dumouchel C., Yangyingsakthavorn P., Cousin J.** Light Multiple Scattering Correction of Laser-Diffraction Spray Drop-Size Distribution Measurements // *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, vol. 35, no. 3, pp. 277–287. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.11.001
11. **Alipchenkov V.M., Zaichik L.I., Zeigarnik Y.A., et al.** The Development of a Three-Fluid Model of Two-Phase Flow for Dispersed-Annular Mode of Flow in Channels: Deposition and Entrainment of Droplets // *High Temperature*, 2002, vol. 40, pp. 716–722. <https://doi.org/10.1023/A:1020488704284>.
12. **Abramovich G.N.** *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics] Moscow: Nauka, 1969. 826 p. In Russ.