

УДК 536.423

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СВОБОДНОЙ СТРУИ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ НА РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА

К. А. Бусов, Н. А. Мажейко

Институт теплофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург, Россия

E-mails: kbusov@itp.uran.ru, nikma2006@yandex.ru

Проведено экспериментальное исследование зависимости формы, структуры и величины угла раскрытия струи воды от степени перегрева. Выявлена связь между различными режимами вскипания и характерными формами вскипающей струи. Установлено, что при одинаковых термодинамических условиях форма и угол раскрытия струи перегретой жидкости изменяются различным образом в зависимости от длины струи. Представлены результаты изменения угла раскрытия вскипающей струи в трех диапазонах: метровом, дециметровом и сантиметровом.

Ключевые слова: перегретая жидкость, взрывное вскипание, распыление, угол раскрытия, короткий канал.

DOI: 10.15372/PMTF20220201

Введение. Струя жидкости, истекающая из отверстия, в зависимости от различных параметров (скорости, давления, температуры, геометрии канала и т. д.) формируется в виде потока с определенными структурой и формой. Выделяется несколько основных режимов и соответствующих им этапов разрушения струи [1, 2]. Для использования жидких струй в различных устройствах необходимо изучить, чем обусловлены те или иные форма и состав потока. Для одних технических приложений (резка металла) необходима сплошная (невозмущенная и неразрушенная) струя [3], для других (создание паровых завес при пожаротушении, впрыск топлива) — полностью раздробленная [4]. Среди множества методов дробления струи жидкости на мельчайшие капли одним из наиболее эффективных является метод взрывного вскипания [5].

В интенсивно вскипающих потоках фазовое превращение происходит взрывообразно и наблюдаются капли, размер которых в несколько десятков раз меньше размеров капель, полученных в случае струй холодных жидкостей, раздробленных вследствие высокого давления [6]. Помимо мелкодисперсного состава при интенсивном вскипании струи могут также возникать другие особенности, не характерные для холодных жидкостей: развернутый угол раскрытия [7], уменьшение до нулевых значений реактивной отдачи [8], наличие в переходных режимах вскипания флуктуаций со спектром мощности, расходящимся по закону $1/f$ [9], истечение струи с изменяющейся формой [10, 11]. Такое разнообразие эффектов, наблюдающихся при интенсивном фазовом переходе жидкость — пар, позволяет как мо-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант № МК-1933.2020.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00091).

© Бусов К. А., Мажейко Н. А., 2022

дернизировать уже работающие устройства, так и проектировать и создавать новые. Например, был сконструирован многоцелевой противопожарный автомобиль, использующий перегретую воду в качестве огнетушащего агента [12]. Использование комплекса особенностей (мелкодисперсность, полное раскрытие и малая реактивная отдача), возникающих при интенсивном вскипании, способствует значительному расширению области применения автомобиля, созданию более безопасных и комфортных условий эксплуатации и расширению сферы применения противопожарной техники (перегретая жидкость используется для устранения ледяного панциря на крупных промышленных объектах и для освобождения рек от ледяного покрова). В других приложениях (распыление топлив и медицинских препаратов, опреснение, струйные принтеры) для повышения безопасности, качества и эффективности устройств также уделяется большое внимание исследованиям структуры, формы и устойчивости факела распыления струи, в частности изменения величины угла раскрытия потока при истечении через различные каналы [13, 14].

Целью настоящей работы является исследование формы, структуры и изменения угла раскрытия свободной струи вскипающей воды в процессе истечения через короткий цилиндрический канал в атмосферу.

1. Экспериментальная установка. Исследуется истечение струй перегретой воды из камеры высокого давления (рис. 1) через короткий цилиндрический канал в неподвижную воздушную среду при атмосферном давлении и комнатной температуре.

Камера имеет форму цилиндрического стакана объемом 630 мл, изготовленного из нержавеющей стали. Короткий цилиндрический канал (диаметр $d = 0,5$ мм, длина $L = 0,7$ мм) с острыми входными и выходными кромками выполнен на свободном конце патрубка таким образом, чтобы внешние элементы конструкции не оказывали влияния на процесс истечения.

Использование канала малой длины позволяет достигать высокой скорости уменьшения давления (приблизительно 10^5 МПа/с), что способствует переводу исследуемой жидкости в область метастабильных (перегретых) состояний.

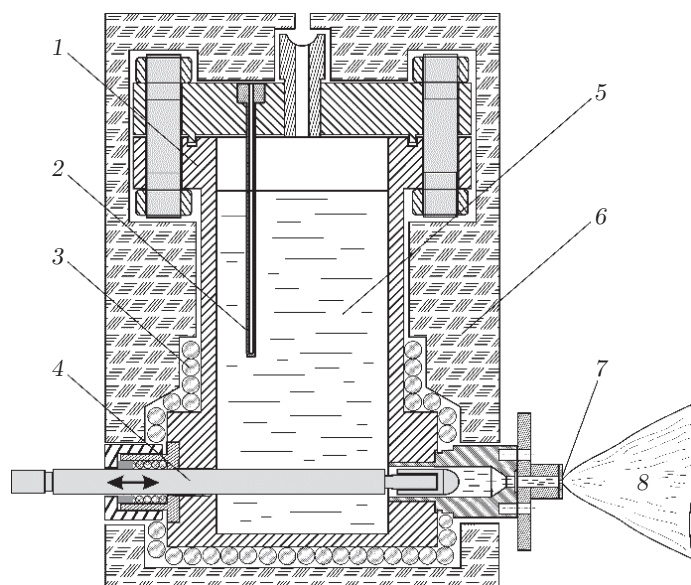


Рис. 1. Схема рабочей камеры:

1 — корпус, 2 — кожух для термодатчика, 3 — нагревательный элемент, 4 — механизм закрывания канала, 5 — исследуемая жидкость, 6 — теплоизоляционный материал, 7 — короткий цилиндрический канал, 8 — струя

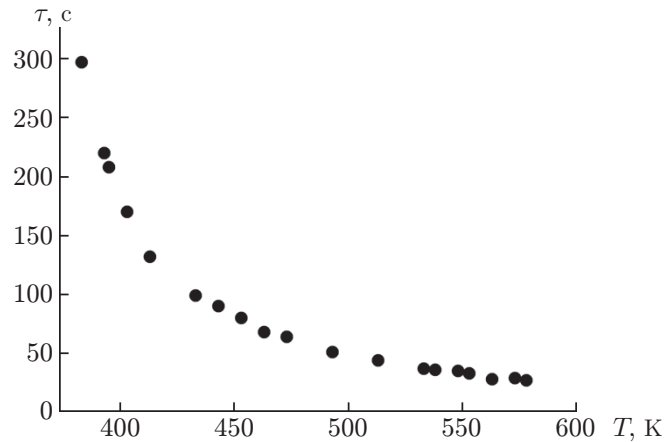


Рис. 2. Зависимость времени истечения воды от температуры

Начальные термодинамические условия (температура, давление) в рабочей камере соответствовали линии фазового равновесия и изменялись в широком диапазоне: $T = 380 \div 580$ К, $p = 0,1 \div 10,0$ МПа. Во всех экспериментах сосуд заполнялся водой с одинаковым объемом $V = 450$ мл. В зависимости от температуры жидкости в рабочей камере изменялось время ее полного истечения (рис. 2).

2. Зародышеобразование в перегретой воде. Процесс кипения характеризуется образованием межфазной поверхности в объеме жидкости. Для образования такой поверхности требуется преодоление некоторого энергетического барьера, равного совершенной работе:

$$W_k = 16\sigma^3 T_s^2 / 3(\rho h \Delta T)^2,$$

где σ — поверхностное натяжение, Н/м; T_s — температура на линии насыщения, К; ρ — плотность, кг/м³; h — теплота парообразования, Дж/кг; ΔT — перегрев жидкости относительно линии насыщения, К.

Таким образом, появление пузырька пара в объеме обусловлено перегревом жидкости. При возникновении зародыша пара система стремится вернуться из метастабильного состояния в равновесное. В зависимости от степени метастабильности (отклонения от границы области устойчивых состояний) изменяется скорость появления соответствующего числа пузырьков пара J в единице объема жидкости за единицу времени:

$$J = NB e^{-W_k/(k_B T)}.$$

Здесь N — число молекул в единице объема; B — кинетический множитель, характеризующий скорость, при которой размер парового зародыша превышает критический размер; k_B — постоянная Больцмана; T — температура жидкости.

Образование жизнеспособного пузырька пара (гетерогенная нуклеация) в большинстве случаев происходит в областях, где преодоление энергетического барьера происходит более легко. Такие области, в которых уменьшается работа W_k по образованию критического пузырька, называются центрами кипения или слабыми местами [5, 15]. Аналитически описать распределение и характеристики всех “слабых мест” не представляется возможным, имеются лишь определенные модели и приближения.

При предельных перегревах, когда температура жидкости близка к температуре термодинамической критической точки ($T_s > 0,9T_c$), зародышеобразование в объеме происходит в основном посредством флуктуаций плотности (гомогенная нуклеация). В этом случае пузырьки пара становятся центрами кипения: локальное зарождение одного пузырька способствует образованию множества других. Такой лавинообразный процесс зародыше-

образования происходит настолько быстро и интенсивно (режим ударного или взрывного вскипания [5, 15]), что парообразование в “слабых местах” не успевает развиваться и его влияние можно не учитывать. Этот вывод хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными и теоретическими представлениями [5].

В зависимости от интенсивности зарождения, развития и взаимодействия паровых зародышей, возникающих в струе перегретой жидкости, происходит изменение ее формы, состава и структуры. Более подробное описание парообразования в струях перегретых жидкостей приведено в работах [5, 16–18].

3. Распыление струи перегретой воды. В струе перегретой воды выделялись три отрезка длиной $l_1 \approx 1$ м, $l_2 \approx 0,1$ м, $l_3 \approx 0,01$ м и анализировалось изменение формы струи в пределах каждого из них. Начало каждого отрезка совпадало с выходным срезом канала. Как показано ниже, на каждом отрезке форма, структура и угол раскрытия потока изменяются различным образом. Такое детальное рассмотрение имеет большое значение для исследования систем соответствующей протяженности, в которых происходит распыление вещества. Например, для применения при пожаротушении, орошении, распылении удобрений необходимо исследовать большие размеры ($l_1 \geq 1$ м), для камер сгорания, поверхностной обработки — средние ($0,1 \text{ м} < l_2 < 1,0 \text{ м}$) для устройств струйной печати, распыления медикаментов — малые размеры ($l_3 < 0,01$ м).

Наиболее значительные изменения формы струи наблюдались при $l \approx 1$ м (рис. 3). При температурах, незначительно превышающих температуру кипения ($383 \text{ К} < T < 413 \text{ К}$), свободная струя не отличается от струи ненагретой жидкости (см. рис. 3, кадры 1–3). Выделяется несколько характерных отрезков: отрезок, на котором поток сохраняет сплошную цилиндрическую форму, отрезок с нарастающими волнами возмущения на поверхности; отрезок, в пределах которого происходит дробление струи на капли. Как и в случае холодной жидкости, процесс разрушения потока происходит вследствие капиллярной и аэродинамической неустойчивости (неустойчивость Гельмгольца).

С увеличением температуры увеличивается интенсивность испарения с поверхности струи, что приводит к уменьшению длины сплошной цилиндрической части потока и увеличению длины раздробленного участка. В этом случае на процесс разрушения потока оказывает влияние еще один вид неустойчивости поверхности раздела — барокапиллярная неустойчивость. Вокруг сплошного жидкостного ядра, в котором начинают проявляться единичные акты вскипания, создается паровой конус (см. рис. 3, кадры 4, 5) с вершиной, смещающейся по мере роста температуры в направлении выходного среза короткого канала.

При температурах $433 \text{ К} < T < 473 \text{ К}$ струя принимает форму конуса с отсутствующей сплошной жидкостной сердцевинкой (см. рис. 3, кадры 6–10). Поток полностью состоит из капель. Форма и состав струи определяются зарождением на гетерогенных центрах пузырьков пара. По мере увеличения степени пересыщения в данном температурном интервале происходит увеличение угла раскрытия конуса струи и капельный состав становится более однородным.

Интенсивное вскипание (высокая скорость возникновения и взаимодействия паровых зародышей), имеющее место при температурах $483 \text{ К} < T < 523 \text{ К}$, приводит к тому, что сплошной конус струи превращается в полый. В этом случае капли в потоке отсутствуют и величина угла раскрытия струи достигает максимального значения (см. рис. 3, кадры 11–15).

При достижении предельной степени метастабильности, когда возникновение и взаимодействие зародышей пузырьков пара происходит настолько интенсивно, что они становятся зонами, инициирующими вскипание, форма струи перегретой воды принимает вид, показанный на рис. 3 (кадры 16–21). Это обусловлено тем, что вскипание происходит

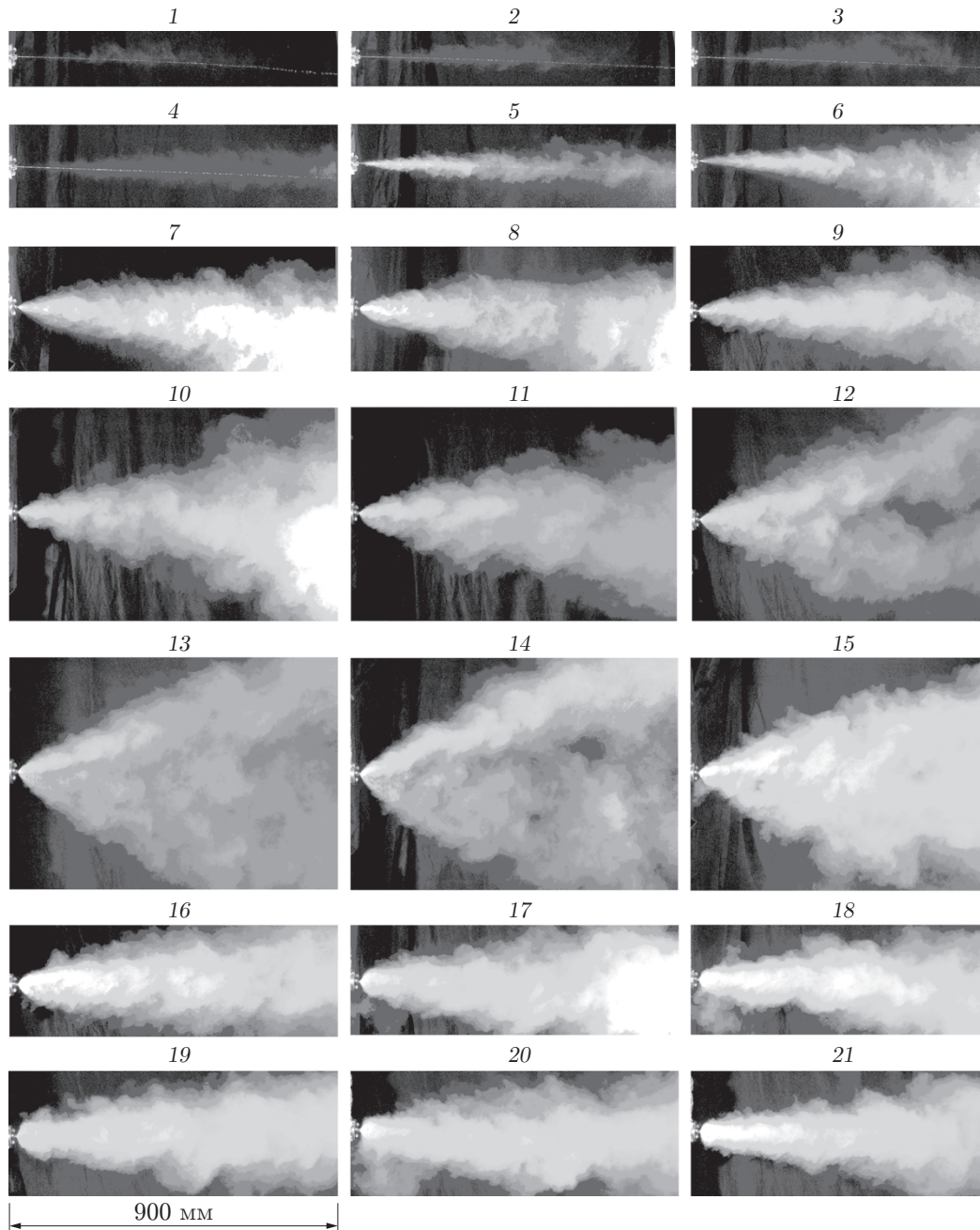


Рис. 3. Изменение формы и структуры струи с увеличением температуры при $l_1 \approx 1$ м:

1 — $T = 383$ K, 2 — $T = 393$ K, 3 — $T = 403$ K, 4 — $T = 413$ K, 5 — $T = 423$ K, 6 — $T = 433$ K, 7 — $T = 443$ K, 8 — $T = 453$ K, 9 — $T = 463$ K, 10 — $T = 473$ K, 11 — $T = 483$ K, 12 — $T = 493$ K, 13 — $T = 503$ K, 14 — $T = 513$ K, 15 — $T = 523$ K, 16 — $T = 533$ K, 17 — $T = 543$ K, 18 — $T = 553$ K, 19 — $T = 563$ K, 20 — $T = 573$ K, 21 — $T = 583$ K

внутри короткого канала (состояние поверхности канала, его входных и выходных кромок оказывает существенное влияние на форму струи), на выходе из которого наблюдается высокое содержание пара. Поэтому, несмотря на высокую интенсивность зарождения и взаимодействия паровых зародышей, величина угла раскрытия струи мала.

Характерная длина второго участка на порядок отличалась от длины первого и составляла приблизительно $l_2 \approx 0,1$ м (рис. 4). В этом случае при небольших значениях перегрева участок дробления струи на капли отсутствует. Имеются лишь сплошное жидкостное ядро и начало участка, где на поверхности струи возникают волны возмущения (см. рис. 4, кадры 1–3).

При увеличении температуры, когда разрушение струи происходит вследствие барокапиллярной неустойчивости, появляется паровой “чулок”, окружающий жидкостную сердцевину, которая постепенно исчезает (см. рис. 4, кадры 4–6). Также наблюдается монотонное увеличение угла раскрытия струи (см. рис. 4, кадры 5–12) до момента времени, в который реализуется механизм взрывного вскипания. Вследствие увеличения интенсивности кипения границы струи становятся более возмущенными (см. рис. 4, кадры 13–21). При интенсивном вскипании в легкоактивируемых областях (гетерогенная нуклеация) струя формируется в виде полого конуса с уменьшающимся углом раскрытия. В условиях, близких к условиям, характерным для гомогенной нуклеации, форма струи меняется: становится не конической, а параболической (см. рис. 4, кадры 17–21).

Анализ струи перегретой воды на участке длиной приблизительно 20 мм позволил более детально изучить особенности ее вскипания. При малых значениях перегрева участки с нарастающими волнами возмущения и дроблением струи на капли исчезают, видна только сплошная жидкостная сердцевина (рис. 5, кадры 1–4).

При температурах $T = 423 \div 433$ К становятся заметны акты вскипания в струе (рис. 5, кадры 5, 6). Как и в рассмотренных выше случаях, при дальнейшем увеличении температуры вскипающая струя принимает форму конуса с увеличивающимся углом раскрытия (рис. 5, кадры 7–18). Однако отчетливо видно, что в данном случае величина угла раскрытия струи значительно превышает величину угла раскрытия потока в двух других рассмотренных случаях. При высокой интенсивности фазовых превращений и при смещении сечения струи, в котором происходит вскипание, вглубь короткого цилиндрического канала характер изгиба границ струи изменяется: они становятся не выпуклыми, как при температурах $443 \text{ К} < T < 523 \text{ К}$ (рис. 5, кадры 7–13), а вогнутыми (рис. 5, кадры 16–21).

4. Угол раскрытия струи вскипающей воды. На основе данных наблюдений и полученных в ходе экспериментов фотографий построена зависимость величины угла раскрытия вскипающей струи от температуры для трех указанных длин струи (рис. 6). Видно, что уже в начале фазового перехода жидкость — пар в струе значения углов раскрытия струй не совпадают. Различие значений углов для наибольшего и наименьшего из рассмотренных размеров струи составляет 20° . С увеличением температуры во всех трех случаях наблюдается практически линейный рост угла раскрытия. В условиях интенсивного гетерогенного зародышеобразования для большого ($l_1 \approx 1$ м) и среднего ($l_2 \approx 0,1$ м) интервалов величина угла раскрытия струи достигает максимума, а затем уменьшается, при этом скорость и величина уменьшения различны.

Заключение. Результаты проведенных лабораторных исследований показали, что струя перегретой жидкости, истекающая через короткий цилиндрический канал, достаточно чувствительна к изменению начальных термодинамических параметров (температуры и давления) внутри сосуда высокого давления и может быть использована в качестве индикатора степени пересыщения системы. Экспериментально установлено, что изменения в струе перегретой воды зависят не только от интенсивности вскипания, но и от длины струи.

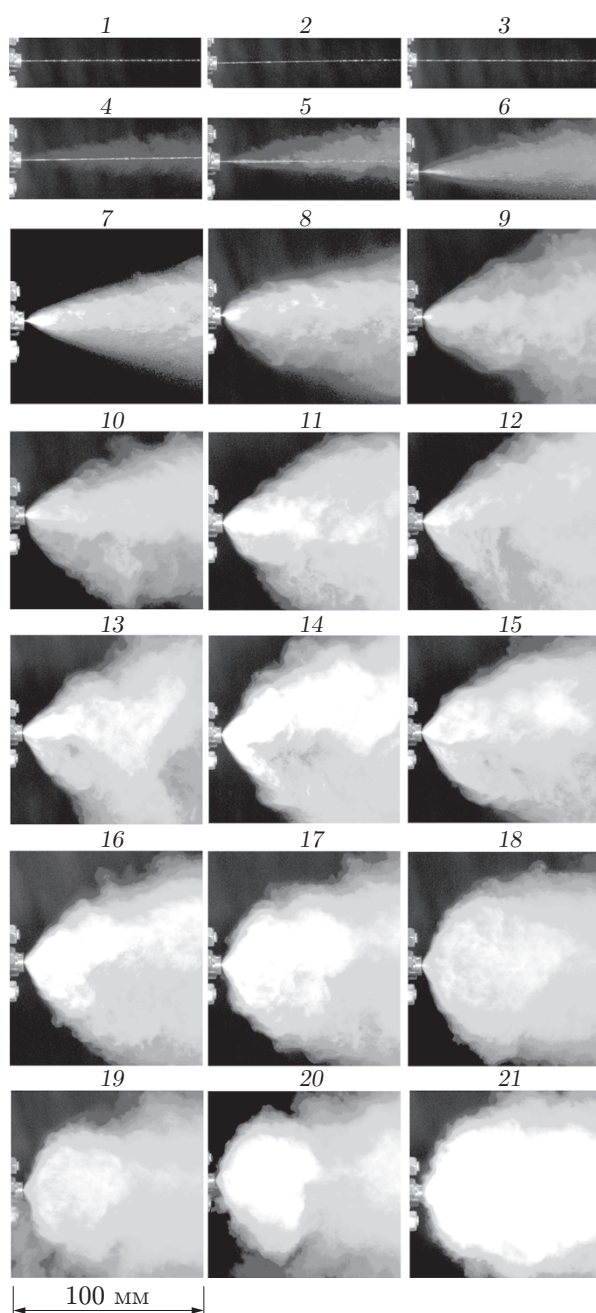


Рис. 4

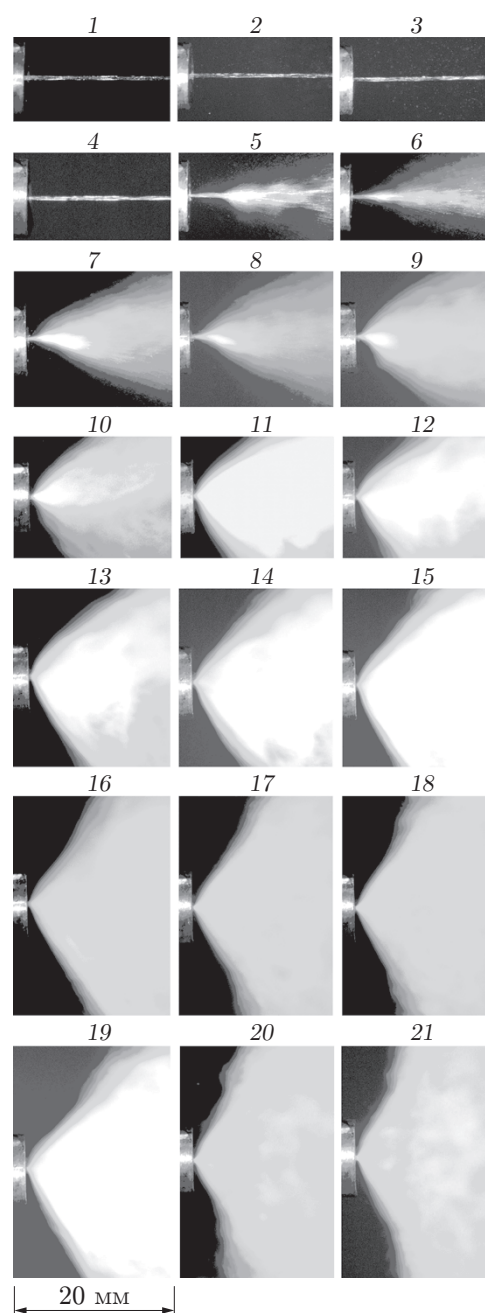


Рис. 5

Рис. 4. Изменение формы и структуры струи с увеличением температуры при $l_2 \approx 0,1$ м: 1 — $T = 383$ К, 2 — $T = 393$ К, 3 — $T = 403$ К, 4 — $T = 413$ К, 5 — $T = 423$ К, 6 — $T = 433$ К, 7 — $T = 443$ К, 8 — $T = 453$ К, 9 — $T = 463$ К, 10 — $T = 473$ К, 11 — $T = 483$ К, 12 — $T = 493$ К, 13 — $T = 503$ К, 14 — $T = 513$ К, 15 — $T = 523$ К, 16 — $T = 533$ К, 17 — $T = 543$ К, 18 — $T = 553$ К, 19 — $T = 563$ К, 20 — $T = 573$ К, 21 — $T = 583$ К

Рис. 5. Изменение формы и структуры струи с увеличением температуры при $l_3 \approx 0,01$ м: 1 — $T = 383$ К, 2 — $T = 393$ К, 3 — $T = 403$ К, 4 — $T = 413$ К, 5 — $T = 423$ К, 6 — $T = 433$ К, 7 — $T = 443$ К, 8 — $T = 453$ К, 9 — $T = 463$ К, 10 — $T = 473$ К, 11 — $T = 483$ К, 12 — $T = 493$ К, 13 — $T = 503$ К, 14 — $T = 513$ К, 15 — $T = 523$ К, 16 — $T = 533$ К, 17 — $T = 543$ К, 18 — $T = 553$ К, 19 — $T = 563$ К, 20 — $T = 573$ К, 21 — $T = 583$ К

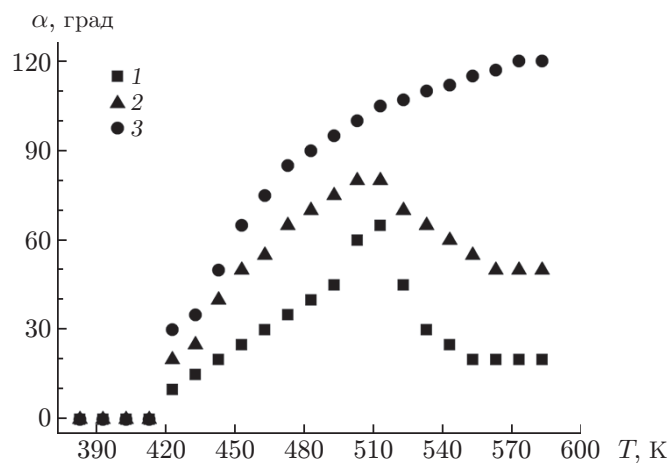


Рис. 6. Зависимость величины угла раскрытия от температуры при различной длине струи перегретой воды:

1 — $l_1 \approx 1$ м, 2 — $l_2 \approx 0,1$ м, 3 — $l_3 \approx 0,01$ м

Полученные экспериментальные данные могут использоваться для создания различных теоретических моделей и расчетов, а также для решения ряда задач регулируемого распыления и установления закономерностей и причин распыления в условиях интенсивных фазовых превращений. На практике результаты экспериментов могут применяться при проектировании новых и совершенствовании имеющихся технических устройств, в которых происходит мелкодисперсное распыление веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rayleigh L. On the instability of jets // Proc. London Math. Soc. 1878. V. 10. P. 4–13.
2. Lefebvre H. Atomization and sprays / H. Lefebvre, V. G. McDonell. Boca Raton: CRC Press, 2017.
3. Engelmeier L., Pollak S., Weidner E. Investigation of superheated liquid carbon dioxide jets for cutting applications // J. Supercrit. Fluids. 2018. V. 132. P. 33–41.
4. Kobashi Y., Hirako S., Matsumoto A., Naganuma K. Flash boiling spray of diesel fuel mixed with ethane and its effects on premixed diesel combustion // Fuel. 2019. V. 237. P. 686–693.
5. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
6. Zalkind V. I., Zeigarnik Yu. A., Nizovskiy V. L., et al. Superheated water atomization: A possibility of obtaining sprays of droplets of micron diameters // High Temperature. 2018. V. 56, N 1. P. 153–155.
7. Решетников А. В., Мажейко Н. А., Скрипов В. П. Струи вскипающих жидкостей // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 125–132.
8. Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., et al. Disintegration of flows of superheated liquid films and jets // J. Engng Thermophys. 2013. V. 22, N 3. P. 174–193.
9. Skokov V. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., et al. $1/f$ noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46, N 10. P. 1879–1883.
10. Бусов К. А., Решетников А. В., Мажейко Н. А., Капитунов О. А. Исследование влияния пассивного завихрителя на истечение перегретой жидкости // ПМТФ. 2019. Т. 60, № 1. С. 62–68.

11. **Busov K. A., Mazheiko N. A., Kapitunov O. A., et al.** Transient modes in a swirl jet of superheated water // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 157. 119711.
12. **Решетников А. В., Роевко В. В., Мажейко Н. А. и др.** Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды // Тепловые процессы в технике. 2013. № 7. С. 295–302.
13. **Polanco G., Holdo A. E., Munday G.** General review of flashing jet studies // J. Hazard. Materials. 2010. V. 173, N 1. P. 2–18.
14. **Sher E., Bar-Kohany T., Rashkovan A.** Flash-boiling atomization // Progress Energy Combust. Sci. 2008. V. 34, N 4. P. 417–439.
15. **Скрипов В. П.** Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В. П. Скрипов, Е. Н. Сеницын, П. А. Павлов и др. М.: Атомиздат, 1980.
16. **Reshetnikov A. V., Busov K. A., Kapitunov O. A., Skokov V. N.** Explosive boiling-up in a swirl jet of superheated ethanol // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 149. 119210.
17. **Решетников А. В., Бусов К. А., Мажейко Н. А. и др.** Переходные режимы вскипания струй перегретой воды // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 3. С. 359–367.
18. **Павлов П. А.** Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988.

*Поступила в редакцию 29/I 2021 г.,
после доработки — 9/III 2021 г.
Принята к публикации 29/III 2021 г.*
