

УДК 536.4

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ НАГРЕВА НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИД. В. Антонов<sup>1,\*</sup>, академик РАН А. К. Ребров<sup>2,\*\*</sup>, П. А. Стрижак<sup>1,\*\*\*</sup>

Поступило 22.05.2019 г.

По результатам экспериментальных исследований выполнено сравнение размеров образующихся фрагментов жидкости вследствие микровзрывного распада капель на основе воды и дизеля. В каждом эксперименте доминировал конвективный, кондуктивный или радиационный теплообмен. Выполнено варьирование температуры среды и концентрации горючего компонента в диапазонах: 100–450 °С, 10–90 об.%. Установлены отношения размеров образованных капель к исходной. Показаны условия, при которых можно в десятки раз увеличить площадь испарения жидкости за счёт микровзрывной фрагментации капель.

*Ключевые слова:* неоднородная капля, микровзрывной распад, конвективный, кондуктивный, радиационный нагрев, вторичное измельчение капель.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884372-376>

## ВВЕДЕНИЕ

Эффекты микровзрывной фрагментации капель жидкостей с многокомпонентным составом в условиях интенсивного нагрева установлены достаточно давно, но их активные исследования проводятся лишь на протяжении последних 15–20 лет [1–6]. Довольно много факторов и процессов остаются неизученными в полной мере [6]. Известны установленные с применением высокоскоростных систем видеорегистрации характеристики микровзрывной фрагментации капель и частиц из различных материалов и веществ: дизель, масла, углеродистые частицы, шламы, вода и др. [7, 8]. В экспериментах параметры нагрева, как правило, приближаются к условиям работы автомобильных двигателей [9]. Также в последние годы опыты проводятся в режимах, соответствующих топочным и контактным теплообменным камерам [10]. Разработаны математические модели [4–6], основанные на применении двух критериев микровзрывного распада капель: достижение температуры воды в составе исходной капли значений, соответствующих её вскипанию и трансформации; превышение размера парового пузыря в составе капли 2–3 начальных размеров последней. Модели [4–6] дают хорошую корреляцию с экспериментами по пороговым (необхо-

димым и достаточным) температурам и временам задержки. Однако по количеству и размерам образующейся совокупности фрагментов жидкости при математическом моделировании получить соответствие с экспериментами крайне сложно. Пока характеристики (количество, размеры, площадь свободной поверхности) образующихся капель принято оценивать лишь по результатам экспериментов [10].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния кондуктивного, конвективного и радиационного механизма подвода тепла к поверхности двухкомпонентной капли на размеры полидисперсной совокупности образующихся при её микровзрывном распаде фрагментов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ  
И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кондуктивный подвод тепла (рис. 1а) осуществлялся по схеме, при которой капля помещалась на поверхности разогретой подложки. Использовались индуктор ВЧ-15АВ (мощность 15 кВт, диапазон частот 30–100 кГц) и подложка в виде цилиндрического диска 12Х18Н10Т с углублением на оси симметрии диаметром 5,5 мм и толщиной 2 мм. Конвективный подвод тепла (рис. 1б) реализовывался при применении нагревателя (Leister LHS 61, максимальная температура воздуха на выходе 700 °С) и нагнетателя высокого давления (Leister Robust с расходом воздуха при 20 °С до 1200 л/мин). Условия радиационного теплообмена (рис. 1в) реализовывались при использовании трубчатой муфельной печи Nabertherm R 50/250/13 (максимальная температура 1300 °С). Диапазон исследуемых температур составил 250–350 °С. При температурах выше 250 °С устой-

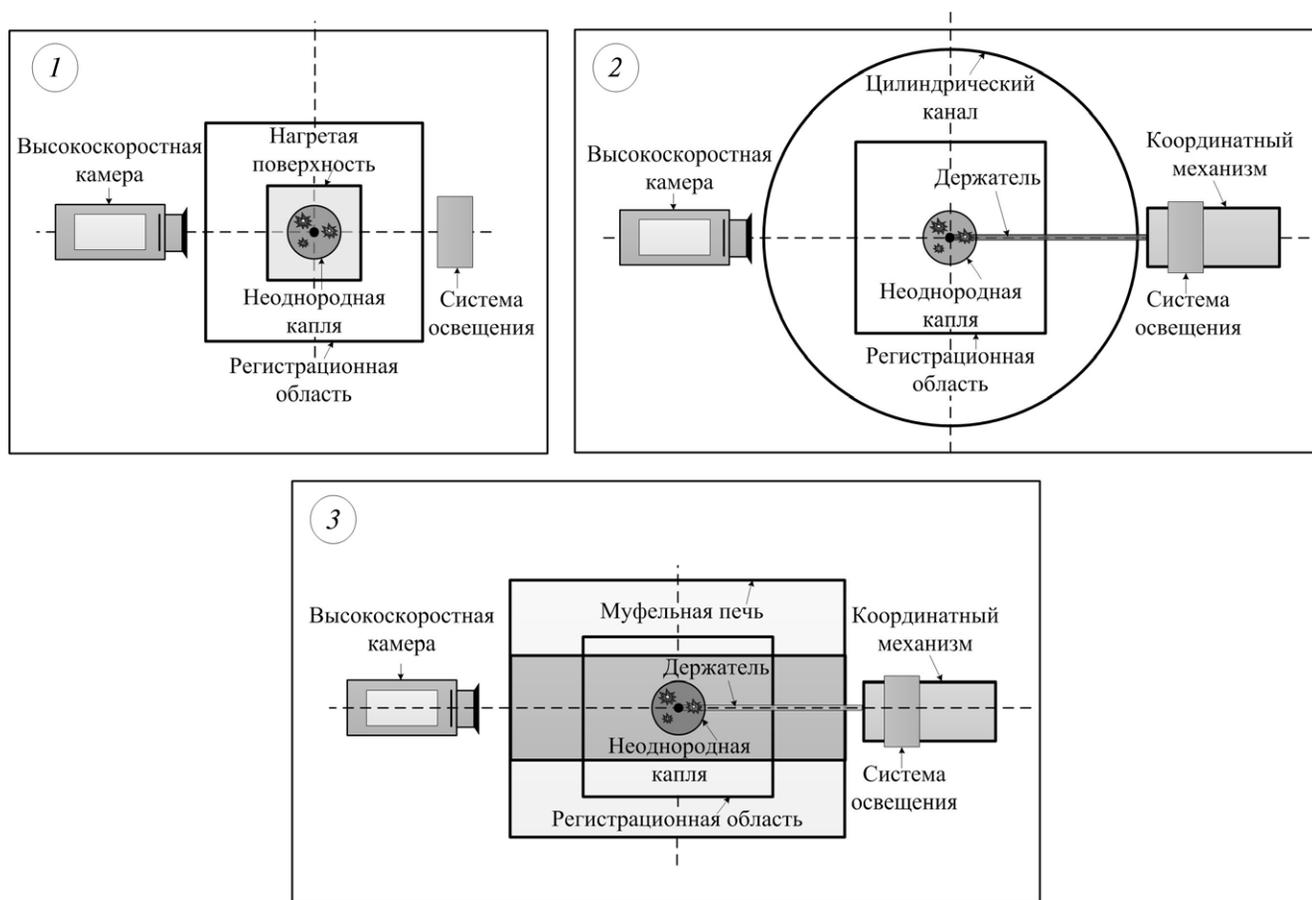
<sup>1</sup> *Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет*

<sup>2</sup> *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск*

\*E-mail: [antonovdv132@gmail.com](mailto:antonovdv132@gmail.com)

\*\*E-mail: [rebrov@itp.nsc.ru](mailto:rebrov@itp.nsc.ru)

\*\*\*E-mail: [pavelspa@tpu.ru](mailto:pavelspa@tpu.ru)



**Рис. 1.** Используемые схемы нагрева (вид сверху) с различными доминирующими механизмами теплообмена (1 – кондуктивный, 2 – конвективный, 3 – радиационный) двухкомпонентных капель для реализации их микровзрывного измельчения.

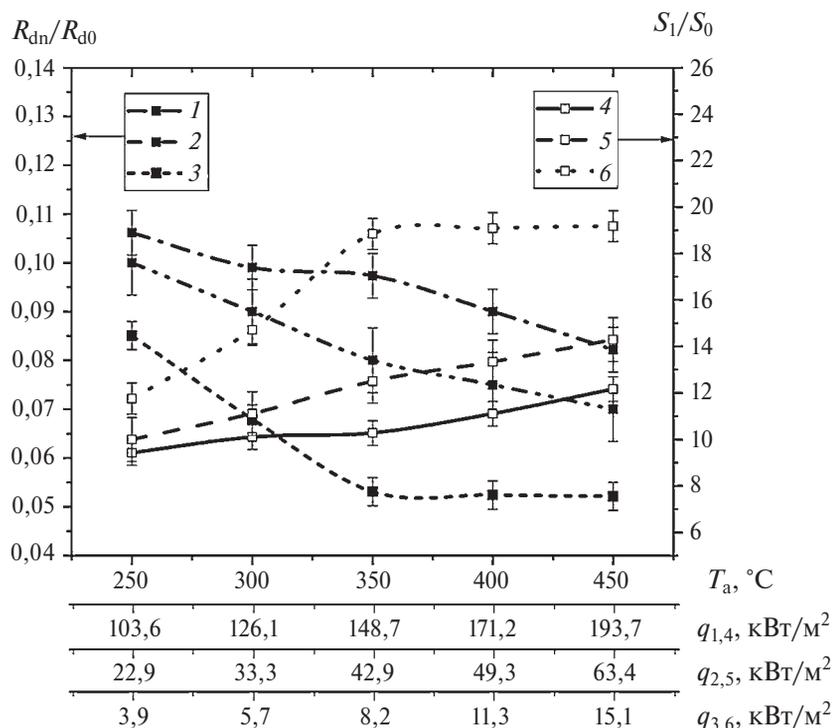
чиво реализовались процессы взрывной фрагментации всех исследованных капель. Температуры выше  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  не воспроизводились в опытах, так как длительности нагрева капель до микровзрыва были существенно меньше 1 с. Капля вводилась передвижным автоматизированным механизмом в рабочую область нагревательных камер в течение 0,5 с.

С помощью высокоскоростной видеокамеры выполнялась регистрация процессов прогрева и распада неоднородных капель. Видеозаписи обрабатывались с использованием программных комплексов Tema Automotive и Actual Flow. В ходе обработки определялись начальный размер исходной ( $R_{d0}$ ) и вторичных ( $R_{dn}$ ) капель. Выполнялось слежение за изменением площади миделевого сечения  $S_m(t)$  деформирующейся капли. С использованием программных алгоритмов слежения Airbag и Advanced Airbag проводился контроль изменения формы капли. По формуле  $R_d = (S_m/\pi)^{0,5}$  вычислялся средний радиус капли  $R_d$ . Погрешности определения  $R_d$  не превышали 3%. Далее анализировались видеозаписи после распада капли. Применялось программное обеспечение

Actual Flow. Проводился анализ теневого изображения, в ходе которого определялись границы и размеры капель. Определялась площадь поверхности жидкости как сумма аналогичных параметров для всех вторичных капель  $S_1 = S_{n(1)} + S_{n(2)} + \dots + S_{n(m)}$  и сравнивалась с площадью поверхности исходной капли  $S_0 = S_m(0)$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых исследований установлены предельные условия по температуре нагрева и концентрациям компонентов, необходимые и достаточные для микровзрывной фрагментации капель исследованных составов. Выделены три возможных режима нагрева: 1) монотонное уменьшение размеров вследствие испарения с сохранением целостности капли; 2) частичная и продолжительная фрагментация (используется термин “puffing” [8–10]); 3) микровзрывной распад (используется термин “micro-explosion” [8–10]). Эти режимы отличаются как длительностями испарения капель, так и совокупностью процессов и эффектов. При этом для трёх



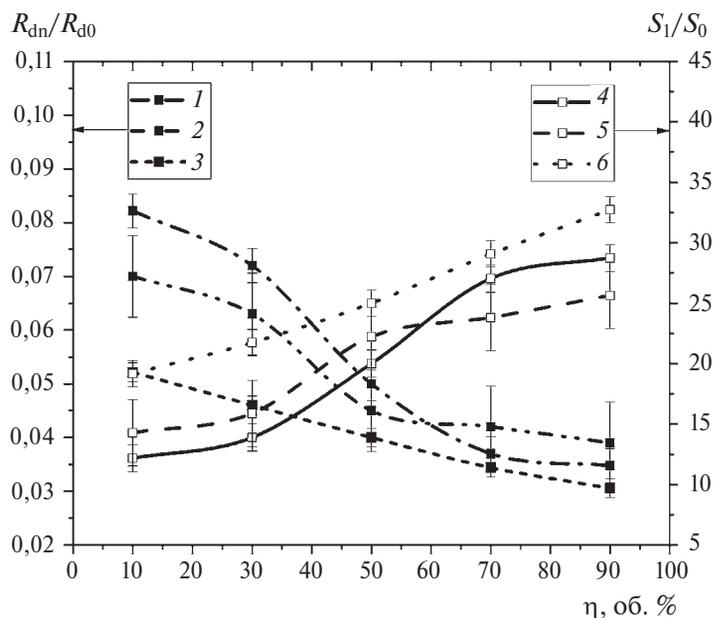
**Рис. 2.** Отношение среднего размера образующихся мелких капель к аналогичному размеру исходной капли (дизельное топливо (10 об.%) и вода (90 об.%),  $R_{d0} \approx 1,33$  мм) при разных температурах нагрева и трёх схемах подвода тепла (1, 4 – кондуктивный, 2, 5 – конвективный, 3, 6 – радиационный).

изученных схем нагрева они значительно отличались. В частности, условия для режимов монотонное испарение/фрагментация/микровзрыв для трёх схем нагрева: кондуктивный 100/150/250 °C; конвективный 200/250/300 °C; радиационный 200/250/300 °C. Максимальная длительность соответствовала первому режиму, минимальная – микровзрыву. Если сравнивать схемы нагрева между собой, то наименьшие времена прогрева при идентичных температурах соответствовали схеме с кондуктивным подводом тепла. Это обусловлено тем, что при такой схеме обеспечивалась возможность подвода энергии к межкомпонентной границе вода–дизель. Также немаловажную роль играл тот фактор, что капля растекалась по поверхности разогретой подложки. Это приводило к уменьшению толщины слоя жидкости и способствовало более быстрому прогреву в отличие от двух других схем нагрева.

Основная причина микровзрывного разрушения неоднородных капель жидкостей состоит в достижении температуры воды значений, близких к температуре её кипения [6–8]. Вследствие обеспечения таких условий в объёме капли вблизи межкомпонентной границы регистрировалось зарождение пузырьков, которые впоследствии объединялись и формировали достаточно большой пузырь. Давление паров в последнем превышало давление, вызванное

силами поверхностного натяжения, и плёнка жидкости разрушалась с образованием облака мелких фрагментов. При радиационном и конвективном нагреве размеры образующегося облака были существенно больше, чем при кондуктивном. Это обусловлено тем, что образующиеся фрагменты разлетались в разные стороны, и не было сдерживающего фактора в виде основания разогретой подложки. Чем выше температура нагрева, тем заметнее были данные эффекты.

Количество мелких капелек было максимальным в опытах с радиационным нагревом, а минимальное для схемы с кондуктивным нагревом. Опыты с конвективным нагревом характеризовались средними значениями исследованных параметров. Установленные особенности обусловлены тем, что при кондуктивном нагреве происходил быстрый и локальный перегрев определённого участка межкомпонентной границы до температуры, близкой к вскипанию воды. Такие условия достаточны для микровзрывной фрагментации исходной капли. Но так как она прогрелась лишь локально, то основная масса имела температуру, несущественно отличающуюся от температуры окружающего воздуха. Как следствие, поверхностное натяжение и вязкость жидкости во всем объёме капли не успевали существенно снизиться в процессе нагрева последней. Поэтому количество



**Рис. 3.** Отношение среднего размера образующихся мелких капель к аналогичному размеру исходной капли (дизельное топливо и вода,  $R_{d0} \approx 1,33$  мм) при варьировании концентрации горючей жидкости для трёх схем подвода тепла (1, 4 – кондуктивный, 2, 5 – конвективный, 3, 6 – радиационный) и температуры 450 °С.

образованных капелек при микровзрыве было ограниченным. В опытах с радиационным нагревом времена подвода тепла, достаточные для микровзрыва, были максимальны относительно двух других схем (на 50–70% больше, чем при кондуктивном, и на 30–40%, чем при конвективном нагреве). Как следствие, обе жидкости в составе двухкомпонентной капли прогревались на довольно большую глубину. Снижались значения их вязкости и поверхностного натяжения.

В опытах с конвективным нагревом следует отметить существенную роль фактора внутренней (“капельной”) конвекции (термогравитационной и термокапиллярной). В [11] показано, что при применении использованной в настоящей работе схемы нагрева скорости конвекции в капле возрастают в несколько раз за счёт теплового (нагрев), динамического (натекание газового потока) и геометрического (размеры) факторов. Интенсификация конвекции в капле приводит к перемешиванию слоёв. В таких условиях перегреть до температуры кипения локальный объём (и тем более всю каплю) крайне сложно, требуются большие длительности подвода тепла. Поэтому времена нагрева для схемы с конвективным теплообменом имеют средние относительно двух других схем значения. Так как жидкости в составе капель интенсивнее прогреваются, то поверхностное натяжение и вязкость существенно снижаются относительно схемы с кондуктивным нагревом. Количество мелких капелек возрастает.

При анализе результатов опытов с радиационным нагревом капель можно отметить, что количество образующихся капелек максимально. Основная причина, скорее всего, состоит в том, что при такой схеме нагрева теплота к границе раздела жидкостей в составе капли подводится равномерно. Как следствие, существенно большее количество пузырьков зарождается на данной границе. Проведённые эксперименты показали, что такие пузырьки могут как объединяться с образованием общего пузыря, так и, наоборот, дополнительно делиться при соударениях между собой. Поэтому довольно большой объём капли заполнялся парами воды. Так как теплопроводность последних мала по сравнению с жидкостями, то длительности прогрева до микровзрыва возрастали, но фрагментация характеризовалась получением большого облака мелких элементов аэрозоля. Этим обусловлены существенные отличия размеров и количества образующихся капелек для трёх схем нагрева на рис. 2 и 3.

Установлено, что имеются диапазоны температур нагрева и соответствующих тепловых потоков, при превышении которых количество и размеры образующихся капелек существенно не меняются. Это обусловлено тем, что температуры жидкости выше не поднимаются, и, соответственно, поверхностное натяжение и вязкость не снижаются. Также важно отметить, что вокруг капель вследствие парообразования формируется буферная паровая зона, снижающая подводимый тепловой поток к капле. Как

следствие, рост температуры нагрева приводит к увеличению толщины этой зоны за счёт вдува большего объёма пара, но практически не изменяет температурное поле капли. Можно сделать вывод об асимптотическом характере изменения размеров капелек при повышении теплоты (рис. 2).

При анализе влияния концентрации горючего компонента на количество и размеры формирующихся капелек (рис. 3) можно отметить неочевидные тенденции. В частности, исходя из свойств воды и дизеля, повышение доли горючего компонента должно было значительно увеличить количество мелких фрагментов. Проведённые эксперименты показали, что рост числа последних имеет асимптотический характер (рис. 3). Это обусловлено тем, что при нагреве воды и дизеля отличия вязкости и поверхностного натяжения дизеля и воды становятся не такими существенными, как при комнатных температурах. При повышении концентрации горючего компонента усиливается прогрев капли за счёт лучистого теплопереноса, а негорючего — за счёт внутренней конвекции. Также важную роль играет фактор изменения размера капли при нагревании. Чем выше концентрация горючего компонента, тем быстрее размер капли уменьшается. Это приводит к повышению расходуемой на этот фазовый переход энергии. Меньше теплоты остаётся для фазовых превращений воды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённых экспериментов позволяют прогнозировать характеристики микровзрывной фрагментации в различных зонах нагревательных камер с преобладанием кондуктивного, конвек-

тивного или радиационного теплообмена, а также являются основанием для вывода о том, что при разработке моделей микровзрыва процедуры выбора и задания среднего размера образующихся фрагментов нужно связывать не только с концентрацией горючего и негорючего компонентов в капле, количеством подведённой энергии, но и схемой нагрева.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект МД–314.2019.8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeng Y., Lee C.F.F. // Proc. Combust. Inst. 2007. V. 31. P. 2185–2193.
2. Watanabe H., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. // Comb. Flame. 2010. V. 157. P. 839–852.
3. Shinjo J., Xia J., Ganippa L.C., Megaritis A. // Phys. Fluids. 2014. V. 26. 103302.
4. Fu W.B., Hou L.Y., Wang L., Ma F.H. // Fuel Proc. Tech. 2002. V. 79. P. 107–119.
5. Zhang Y., Huang Y., Huang R., Huang S., Ma Y., Xu S., Wang Z. // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 133. P. 633–644.
6. Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Aziz A.R.B.A. // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. V. 131. P. 815–821.
7. Dai Z., Faeth G.M. // Int. J. Multiph. Flow. 2001. V. 27. P. 217–236.
8. Antonov D., Bellettre J., Tarlet D., Massoli P., Vysokomornaya O., Piskunov M. // Energies. 2018. V. 11. 3307.
9. Mura E., Josset C., Loubar K., Huchet G., Bellettre J. // At. Sprays. 2010. V. 20. P. 791–799.
10. Nakoryakov V.E., Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Doklady Phys. 2018. V. 63. № 11. P. 462–466.
11. Volkov R.S., Strizhak P.A. // Exp. Therm. Fluid Sci. 2018. V. 97. P. 392–407.

## THE INFLUENCE OF THE HEATING SCHEME OF A HETEROGENEOUS DROP ON THE CHARACTERISTICS OF MICRO-EXPLOSION FRAGMENTATION

D. V. Antonov<sup>1</sup>, Academician of the RAS A. K. Rebrov<sup>2</sup>, P. A. Strizhak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Received May 22, 2019

According to the experimental results, a comparison of sizes of child-droplets after micro-explosion of drop based on water and diesel has been made. Convective, conductive, or radiative heat exchange has been dominated. The temperature of the medium and the relative volume concentration of the flammable liquid have been varied in ranges: 100–450 °C, 10–90 vol. %. The ratios of the sizes of the formed drops to the initial ones have been established. The conditions which it is possible to increase the total evaporation surface area of a liquid by tens of times are shown.

**Keywords:** heterogeneous drop; micro-explosion; convective, conductive, radiative heating; secondary atomization.