

2. Атрошенко Ю.К., Стрижак П.А. Необходимое время измерения термоэлектрическими преобразователями с защитными гильзами // Датчики и системы. – Москва, 2015. – № 5 (192). – С. 23–27;
3. Атрошенко Ю.К., Стрижак П.А. О влиянии защитной гильзы на погрешность измерения температуры термоэлектрическими преобразователями // Энергетик. – Москва, 2015. – № 10. – С. 52–55;
4. Региональная экономика: учебник / под ред. В.И. Видяпина и М.В. Степанова. – М.: Инфра-М, 2007. – 666 с.;
5. ГОСТ 6616–94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 15 с.
6. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник / под ред. Е.Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
7. Исакович Р.Я. Контроль и автоматизация добычи нефти и газа: учебник / Р. Я. Исакович, Б. Л. Кучин, В. Е. Попадько. – М.: Недра, 1976. – 344 с.
8. Свердлов Г.М. Автоматизированные системы управления технологическими процессами при добыче нефти за рубежом / Г.М. Свердлов, Р.Ю. Ягудин. – М.: Недра, 1983. – 221 с.
9. Шишкин Н.Д., Трофименко К.В. Алгоритм автоматизации процесса индукционного подогрева нефти // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – Астрахань, 2012. – № 1. – С. 79–84.

**ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ
С ТВЕРДЫМИ НЕРАСТВОРИМЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ
ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ**

А.Г. Борисова, М.В. Пискунов, Н.А. Хомутов
Научный руководитель заведующий кафедрой П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение

В настоящее время исследования процессов теплообмена в мире в основном направлены на установление условий их значительной интенсификации. При этом существует общепринятая классификация, включающая активные и пассивные методы интенсификации теплообмена. Наиболее широко распространёнными являются пассивные методы, поскольку практически не требуют вмешательства внешних сил. Одно из направлений исследований, разрабатываемых в рамках пассивных методов интенсификации теплообмена, обусловлено экспериментальным и теоретическим изучением жидкостей с добавлением инородных твердых включений. Известно (например, [1, 3]), что жидкости с твердыми примесями обладают, как правило, улучшенными теплофизическими характеристиками. Поэтому представляют значительный интерес для высокотемпературных технологий в нефтегазовой, нефтехимической и энергетической отраслях промышленности. Таким образом, получение достоверных результатов экспериментальных исследований фазовых превращений жидкостей с добавлением твердых включений при высоких температурах характеризуется высокой научной значимостью.

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение ряда закономерностей фазовых превращений капель воды с твердыми непрозрачными включениями в высокотемпературной газовой среде с применением высокоскоростной видеорегистрации.

Экспериментальный стенд и методы исследований

По основным элементам экспериментальный стенд аналогичен примененному в исследовании [2]. По основным этапам методика выполнения экспериментов также является аналогичной примененной в [2].

Исследования проводились с каплями воды (начальный объем 5–15 мкл), содержащими одиночные крупные (соизмеримые по размерам с каплей воды) твердые включения (размером 1–4 мм). В сформированных неоднородных каплях размером ~3–5 мм в ряде экспериментов присутствовали мелкие включения (размером 0,05 и 0,2 мм). Нагрев неоднородных капель проводился в различных газовых средах для создания температурных условий, максимально близких к тем, которые характерны для широкой группы практических приложений (термическая очистка жидкостей, пожаротушение и т.д.). В качестве генераторов высокотемпературных газовых сред применялись муфельная трубчатая печь, топливная горелка с газовой камерой и воздухонагреватель с каналом, по которому двигался поток разогретого воздуха. Температура нагрева неоднородных капель в экспериментах варьировалась в диапазоне от 300 до 1400 К. Мониторинг и регистрация изменений температуры газовой среды и контроль температур жидкостей в составе неоднородных капель (перед опытами) выполнялись термоэлектрическими преобразователями.

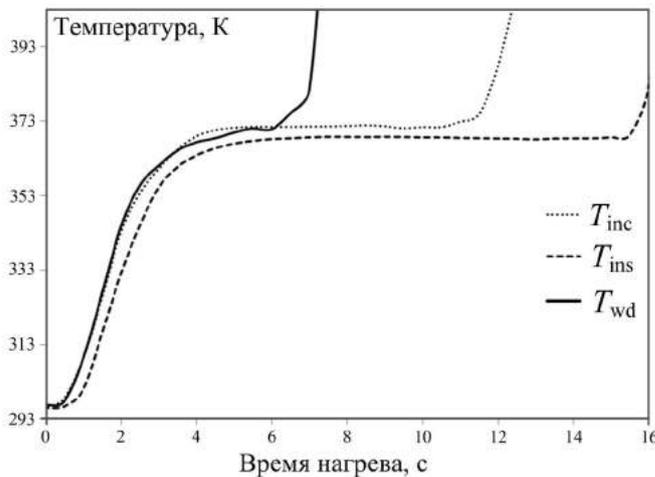
Систематические погрешности определения времен существования неоднородных капель воды составляли менее 10^{-3} с. Систематические погрешности средств измерения размеров включения – 0,05 мм. Случайные погрешности определения температуры газовой среды и времен существования капель составили 7–9 %.

Результаты исследований и их обсуждение

В работе [2] установлено, что парообразование неоднородных капель жидкости в рассматриваемых условиях может реализовываться по одной из трех схем (1 схема – испарение жидкости со свободной поверхности капли, 2 и 3 схемы – интенсивное парообразование на внутренних границах раздела сред неоднородной капли с взрывным дроблением слоя жидкости; отличия второй и третьей схем заключаются в длительностях процессов взрывного дробления и механизмах подведения тепловой энергии в внутренним границам раздела сред). Предполагается, что при выполнении третьей схемы (при соблюдении условия полного обволакивания включения каплей

жидкости [2]) энергия в основном проходила к внутренней границе раздела сред через пленку жидкости за счет лучистого переноса и аккумулировалась у поверхности твердого включения.

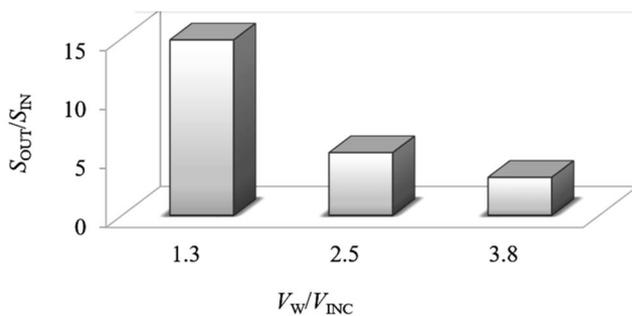
Сформулированное предположение подтвердилось после анализа результатов (см. рис. 1) эксперимента по измерению температуры в глубине включения (T_{ins}), на его поверхности (T_{inc}) и на поверхности пленки воды (T_{wd}). Установлено, что температура на поверхности включения (T_{inc}) является максимальной в рассматриваемой гетерогенной системе. Кроме того, показано (см. рис. 1), что влияние керамического стержня на процессы теплообмена при нагреве неоднородных капель является незначительным. Дробление исходного объема воды на капли с малыми характерными размерами позволяет значительно интенсифицировать процесс



испарения и значительно уменьшить время существования этого объема [2]. Этот эффект в значительной степени обусловлен увеличением суммарной площади поверхности образующихся мелких капель при сравнении с начальной площадью капли воды (рис. 2). Важно отметить, что наибольшее число сформировавшихся в результате дробления слоя жидкости неоднородной капли фрагментов характерно для экспериментов с минимальным соотношением объема воды (V_w) к объему включения (V_{inc}). Снижение соотношения V_w/V_{inc} приводит к уменьшению толщины пленки жидкости вокруг всего включения. При этом прогрев капли происходит более равномерно, и фрагменты жидкости отрываются практически от всех граней включения.

Рис. 1. Зависимости температур T_{wd} , T_{inc} , T_{ins} от времени нагрева для экспериментов по прогреву элементов неоднородной капли.

Комментарий: представленные на рис. 1 зависимости получены в результате усреднения экспериментальных данных (проводилось не менее 10 опытов). Максимальное среднее квадратичное отклонение серии измерений T_{wd} , T_{inc} , T_{ins} не превышало 2 К



Увеличение площади поверхности теплообмена ускоряет подвод энергии от внешней газовой среды и ее поглощение в результате фазовых превращений. Таким образом, для увеличения площади S_{out} возможным становится выбор оптимальных соотношений V_w и V_{inc} .

Выполненные эксперименты показали, что введение в объем воды включений позволяет существенно интенсифицировать процесс испарения жидкости и варьировать роли доминирующих механизмов теплообмена и фазовых превращений.

Рис. 2. Зависимости отношения общей площади поверхности испарения отделившихся капель после взрывного дробления S_{out} к начальной площади поверхности капли S_{in} (объемом 5, 10 и 15 мкл) от отношения объемов воды V_w и включения V_{inc} (с характерным размером 1 мм) в неоднородной капле жидкости

Заключение

При нагреве и испарении неоднородной капли воды в газовой среде (воздухе) с температурой 1070–1370 К площадь поверхности испарения в результате интенсивного парообразования жидкости с ее взрывным дроблением на мелкие фрагменты может увеличиваться в 3–15 раз относительно начальной площади поверхности капли. Максимальное число отделившихся фрагментов жидкости зафиксировано при условии $V_w \sim V_{inc}$. Установлено, что при соблюдении условия полного обволакивания включения пленкой жидкости значительное влияние лучистого теплообмена характеризуется нагревом внутренней границы раздела сред (поверхность твердого включения) в неоднородной капле до температуры на 3–4 К выше, чем температура поверхности пленки воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД-1221.2017.8) и стипендии Президента Российской Федерации (СП-1049.2016.1).

Литература

1. Barber J., Brutin D., Tadrist L. A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids//Nanoscale Research

- Letters. – 2011. – V. 6. – P. 1–16.
2. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas//International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 92. – P. 360–369.
 3. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area// International Journal of Thermal Sciences. – 2015. – V. 88. – P. 193–200.

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАЖИГАНИЯ
КАПЕЛЬ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ, ВИТАЮЩИХ В ПОТОКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ**

Т.Р. Валиуллин, С.А. Шевырев

Научный руководитель П.А. Стрижак, д.ф.-м.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В качестве наиболее перспективных энергоресурсов принято считать органоводоугольные топливные композиции (ОВУТ) на основе многочисленных отходов нефтепродуктов, отработанных масел, низкосортных нефтей и углей, фильтр-кеков и др. Для исследования характеристик процессов зажигания и горения витающих капель ОВУТ в отличие от стационарно подвешиваемых капель (на спае термопары, стержнях, проволочках и др.) проводилась оценка параметров витания капли топливной композиции в кварцевой трубе. Целью оценки являлось определение геометрических размеров расширяющейся части кварцевой трубы (с конусообразными входными и выходными каналами), в которой происходило зажигание капли потоком нагретого воздуха. В качестве перспективной конструкции принята модельная конусообразная камера сгорания. Это позволяло за счет изменения давления потока воздуха (проявляющейся в наличии перепада давления по высоте слоя) в вертикальном направлении удерживать каплю в заданном диапазоне высот.

Исходные данные для расчета параметров конусообразного канала:

1. Начальный диаметр конуса, $d_{cr} = 80$ мм (диаметр трубы d_{tr} соответствует входному диаметру конуса)
2. Расход вентилятора высокого давления при 20 °С, $V_a = 1200$ л/мин (вентилятор вихревой Leister R.)
3. Размер (диаметр) капли, $d = 1,5$ мм (без учета коэффициента сферичности)
4. Влажность исходной капли ОВУТ, масс., $W^a = 43,5$ %
5. Зольность исходной капли ОВУТ масс., $A^d = 25$ %

При расчете условий витания капли ОВУТ сделаны следующие допущения:

1. Коэффициент сферичности капли $\varphi = 0,73$ [1].
2. Перемещение капли в вертикальном направлении в диапазоне 0–120 мм (высота рассчитываемого конуса).
3. Свойства компонентного состава ОВУТ (плотность, зольность и др.).

Методика расчета условий витания капли аналогична [2, 3].

Скорость потока воздуха по сечению канала, при которой одиночная капля переходит во взвешенное состояние, является скоростью витания [3]. Она соответствует началу разрушения монодисперсного взвешенного слоя. При этом ε – пористость (относительная доля объема, не заполненного твердой фазой):

$$\varepsilon = 1 - \rho_n / \rho_d$$

где ρ_n – насыпная плотность, ρ_d – плотность тела (капли).

Скорость витания может быть определена по выражениям [2, 3]:

$$Re_{vit} = Ar / (18 + 0,61 \cdot (Ar)^{0,5}); Re_{vit} = (\omega_{vit} d_d \rho_a) / \mu_a$$

где ω_{vit} – скорость витания, м/с; d_d – диаметр капли, м; ρ_a , μ_a – плотность (кг/м³) и динамический коэффициент вязкости среды (Па·с) воздуха; Ar – критерий Архимеда.

Параметры воздуха: плотность 0,43 кг/м³ и динамический коэффициент вязкости $376 \cdot 10^{-7}$ приняты для температуры 550 °С [4].

Размер капли (эквивалентный диаметр) с учетом отклонения от сферической формы составляет [1]:

$$d_d = d\varphi = 1,5 \cdot 0,73 = 1,095 \text{ мм.}$$

Для вычисления критерия Архимеда необходимо определить плотность капли ОВУТ. В соответствии со справочными данными [5, 6] плотность угольной пыли в составе ОВУТ 1700 кг/м³.

Плотность капли ОВУТ в начальном состоянии:

$$\rho_d = 0,435 \cdot 988 + 0,565 \cdot 1700 = 1394 \text{ кг/м}^3.$$

Критерий Архимеда [2, 3] для температуры воздуха 550°С:

$$Ar = (d_d^3 g \rho_a (\rho_d - \rho_a)) / \mu_a^2 = ((1,095 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,8 \cdot 0,43 \cdot (1394 - 0,43)) / (376 \cdot 10^{-7})^2 = 5453,68$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{vit} = Ar / (18 + 0,6 \cdot (Ar)^{0,5}) = 5453,68 / (18 + 0,6 \cdot (5453,68)^{0,5}) = 87,52.$$

Скорость витания: