

- 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  $\varepsilon$  – пористость (относительная доля объема, не заполненного твердой фазой):

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

где  $\rho_n$  – насыпная плотность,  $\rho_d$  – 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  $\omega_{vit}$  – скорость витания, м/с;  $d_d$  – диаметр капли, м;  $\rho_a$ ,  $\mu_a$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>) и динамический коэффициент вязкости среды (Па·с) воздуха;  $Ar$  – критерий Архимеда.

Параметры воздуха: плотность 0,43 кг/м<sup>3</sup> 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/м<sup>3</sup>.

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:

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

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:

$$\omega_{vit} = (Re_{vit} \mu_a) / (d_d \rho_a) = (87,52 \cdot 376 \cdot 10^{-7}) / (1,095 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43) = 6,98 \text{ м/с.}$$

При температуре воздуха в трубе 550 °С с учетом его плотности 0,43 г/л объемный расход воздуха:

$$G_a = \rho_a^{20} V_a = 1,2 \cdot 1200 = 1440 \text{ г/мин.}$$

где  $\rho_a^{20}$  - плотность воздуха при 20 °С

$$V_a = G_a / \rho_a^{20} = 1440 / 0,43 = 3348 \text{ л/мин или } V_a = (3348 \cdot 10^{-3}) / 60 = 0,0558 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Скорость воздуха в трубе диаметром 80 мм составляет:

$$\omega = V_a / F = V_a / 0,785 \cdot d_{tr}^2 = 0,0558 / 0,785 \cdot (80 \cdot 10^{-3})^2 = 11,1 \text{ м/с.}$$

Таким образом, требуемая скорость витания будет обеспечена и капля ОВУТ способна перемещаться вертикально по трубе вдоль расширяющейся части конуса.

Рассчитаем размеры конуса для кварцевой трубы. Будем считать, что меньший диаметр конуса соответствует диаметру кварцевой трубы. Максимальную высоту конуса примем 120 мм. Примем, что скорость витания одиночной частицы 6,98 м/с соответствует меньшему диаметру конуса – 80 мм.

Рассмотрим последнее промежуточное состояние капли, чтобы определить угол раскрытия конуса: полное выгорание органической массы с образованием зольного каркаса. Для данного промежуточного состояния капли диаметр капли соответствует 1,095 мм (модель сохраняющегося зольного каркаса). Плотность зольного каркаса в частице диаметром 1,095 мм составит:

$$\rho_{zk} = \rho_z A^d = 2400 \cdot 0,25 = 600 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_{zk}$  – истинная плотность золы (в диапазоне 2100–2400 для Кузнецких углей) [7].

Критерий Архимеда:

$$Ar = (d_d^3 g \rho_s \cdot (\rho_d - \rho_a)) / \mu_a^2 = ((1,095 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,8 \cdot 0,43 \cdot (600 - 0,43)) / (376 \cdot 10^{-7})^2 = 2346,4$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{vit} = Ar / (18 + 0,6 \cdot (Ar)^{0,5}) = 2346,4 / (18 + 0,6 \cdot (2346,4)^{0,5}) = 49,85$$

Скорость витания:

$$\omega_{vit} = (Re_{vit} \mu_a) / (d_d \rho_a) = (49,85 \cdot 376 \cdot 10^{-7}) / (1,095 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43) = 3,98 \text{ м/с.}$$

При данной скорости и расходе воздуха 0,0588 м<sup>3</sup>/с диаметр конуса составляет:

$$d = (V_a / 0,785 \omega)^{0,5} = (0,0588 / 0,785 \cdot 3,98)^{0,5} = 0,137 \text{ м.}$$

Следовательно, больший диаметр конуса составляет 137 мм. Высота конуса принята ранее 120 мм. Значит, угол раскрытия конуса составляет около 24 градусов (рис. 1).

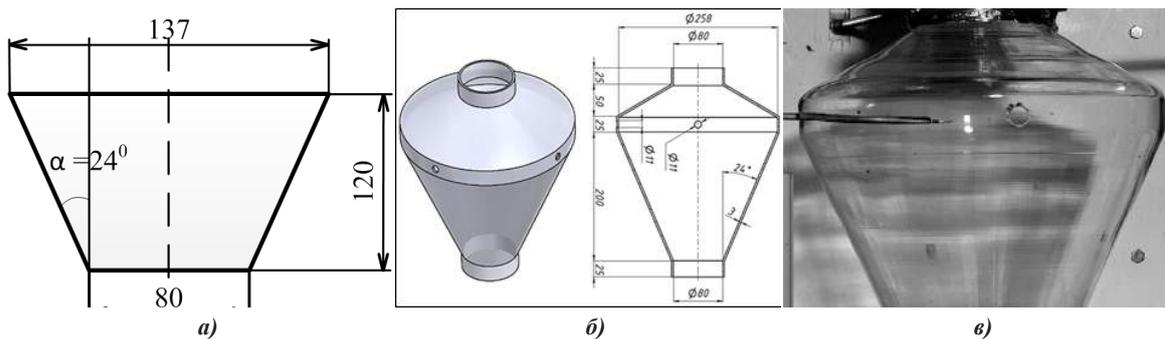


Рис.1. а) конусообразный канал для создания условий витания капель ОВУТ; б) модельная конусообразная камера сгорания, выплавленная завод-изготовителем; в) изображение камеры сгорания.

В связи с технологическими ограничениями, заводом производителем внесен поправочный коэффициент по выплавки конусообразной камеры из кварцевого прозрачного оптического стекла. Тем самым больший диаметр конуса увеличен практически в два раза (составил 258 мм). Размеры входных и выходных каналов остались, и угол раскрытия конуса остались без изменений. Для контроля температуры в камере сгорания хромель-алюмелевой термопарой, а также ввода и сброса капель ОВУТ в ее боковой части сделаны два технологических отверстия диаметром 11 мм. Камера изготовлена общей высотой 325 мм. Высота активной зоны витания капель (частиц) ОВУТ составляет около 200 мм. Это позволило расширить границы допустимых скоростей витания

капель (для совокупности одиночной, малой группы и потока капель) ОВУТ.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 15-19-10003).*

#### Литература

1. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / А.П. Баскаков [и др.]. Л.: Химия, 1986. – 352 с.
2. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. – 247 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1976. – 552 с.
4. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. – 720 с.
5. Сухоруков В.И. Научные основы совершенствования техники и технологии производства кокса. Екатеринбург: АЛЛО, 1999. – 393 с.
6. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
7. Павленко С.И. Мелкозернистые бетоны из отходов промышленности. М.: АСВ, 1997. – 176 с.

### РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ УГЛЕ – И НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

**К. Ю. Вершинина**

*Научный руководитель: с.н.с. кафедры АТП, С. Ю. Лырщиков*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*

Переработка основных органических энергоносителей – нефти и угля сопровождается образованием отходов – нефтешламов и фильтр-кеков [1, 2], соответственно. Объемы этих отходов составляют в зависимости от месторождений, технологии переработки и интенсивности производства от 8 % до 15 % к объему добычи энергоносителей [3]. В России данные вопросы особенно актуальны в связи с открытым хранением большинства таких отходов. К настоящему времени стало понятным, что дальнейшее захоронение или хранение на открытых площадках фильтр-кеков, нефтешламов и отработанных горючих жидкостей становится невозможным. Необходимы срочные мероприятия международного уровня по переработке как накопившихся за последние десятилетия отходов, так и вновь образующихся.

Одним из самых перспективных решений данной проблемы может быть утилизация отходов нефте- и углепереработки с использованием технологий водоугольных (ВУТ) [4] и органоводоугольных (ОВУТ) [5, 6] суспензий, так как такие топлива транспортируются с применением трубопроводов, имеют меньшие концентрации антропогенных выбросов за счет добавления воды характеризуются повышенной пожаровзрывобезопасностью. В качестве компонентов таких топлив могут применяться многочисленные отходы углепереработки или низкосортные угли. Также потенциальными компонентами ВУТ и ОВУТ могут стать [5, 6] отработанные горючие жидкости, нефтешламы, смолы и др.

Фильтр-кеки представляют перспективные (по экономическим, экологическим, энергетическим характеристикам [5, 6], а также с точки зрения пожаровзрывобезопасности) компоненты топлив, но слабо изученные. В-первую очередь, отсутствует информация о реологических свойствах ОВУТ на основе таких кеков.

Цель настоящей работы – получение информационной базы данных о реологических свойствах суспензий ОВУТ, приготовленных на основе наиболее широко производимых фильтр-кеков.

В качестве основного компонента органоводоугольного топлива использовались отходы обогащения каменных углей – фильтр-кеки, полученные на группе обогатительных фабрик Кемеровской области (Россия, Кузбасс). В качестве жидкого горючего компонента использовались мазут и отработанное турбинное масло. Реологические свойства органоводоугольных топливных композиций изучались с помощью ротационного вискозиметра MLW Rheotest 2. Результаты определения напряжения сдвига от скорости сдвига для всех изученных составов удовлетворительно описываются моделью Балкли – Гершеля.

В работе определены реологические свойства перспективных суспензий ОВУТ, приготовленных из отходов обогащения угля и использованных нефтепродуктов, таких как фильтр-кеки обогащения углей различной стадии углефикации и отработанные индустриальные масла. Вязкость изученных в работе составов лежит в диапазоне 200 – 600 мПа\*с. Показано, что вязкость составов ВУТ на основе кеков определяется, в первую очередь, стадией углефикации обогащаемого угля, а для составов ОВУТ вязкость не коррелирует со стадией углефикации обогащаемого угля. Изучено влияние компонентного состава топлива (содержание воды), типа и концентрации используемого жидкого горючего компонента, температуры и времени хранения топлива на вязкость суспензий ОВУТ. Установлена возможность регулирования вязкости топливных составов для достижения требуемых для практического применения значений и определены критерии оптимизации составов топлив, такие как теплота сгорания, время зажигания и полного сгорания, вязкость составов.

Полученные нами закономерности изменения реологических свойств топлив качественно соответствуют описанным в литературе свойствам для подобных видов топлива, но провести количественное сравнение характеристик топлив довольно сложно вследствие широчайшего набора возможных компонент, используемого различными авторами, а так же довольно сильно различающихся соотношением компонентов в составах.