

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ФАКЕЛА ЖИДКОСТИ С НАГРЕТЫМИ ГРАНУЛИРОВАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

© 2006 В.Е. Нигодюк, А.Ю. Лыкин

Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье рассматривается экспериментальное исследование взаимодействия капельного факела жидкости с нагретыми гранулированными засыпками из СВС составов для гранул различных размеров и толщин слоя. Результаты экспериментов представлены в виде зависимостей массовой доли испарённой жидкости от температуры верхнего слоя засыпки, толщины засыпки и размеров гранул.

В объектах с небольшим периодом активного функционирования, типа разгонных блоков и спускаемых аппаратов применяются двигательные установки (ДУ) систем пространственного управления с вытеснительной подачей топлива и жидкостными ракетными двигателями малой тяги (ЖРД МТ) на топливе НДМГ + АТ, работающих в импульсных режимах. Перспективным направлением совершенствования таких ДУ является использование для наддува топливных баков газогенераторных систем, при этом допустимая температура «сладкого» генераторного газа может составлять 1100...1300 К.

Исследовалась возможность создания однокомпонентных газогенераторов (ГГ), обеспечивающих разложение горючего ДУ – НДМГ. Известно, что НДМГ экзотермически разлагается с образованием газообразных продуктов разложения температурой до 1300 К. Однако, предварительно необходимо испарить горючее и прогреть пары до температуры начала активного разложения ~ 600...700 К. Очевидно, для этого необходимо иметь в камере ГГ мощный источник тепла, который, учитывая импульсный характер работы ГГ в подобных ДУ, должен обладать теплоинерционными, аккумулирующими выделяемое при разложении НДМГ тепло, свойствами.

Бала рассмотрена возможность использования в этих целях гранулированных (шарообразных) элементов из безгазовых твёрдофазных СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез) составов [1], которые размещаются в виде засыпок в камере ГГ с внутренней теплозащитой.

В рамках данной работы исследовалось взаимодействие капельного факела,

создаваемого центробежной форсункой с нагретой пористо-гранулированной структурой СВС элементов состава  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ . Характер протекающих при этом процессов изучался с использованием модельной жидкости – дистиллированной воды.

Схема экспериментальной установки для этих опытов представлена на рис. 1.

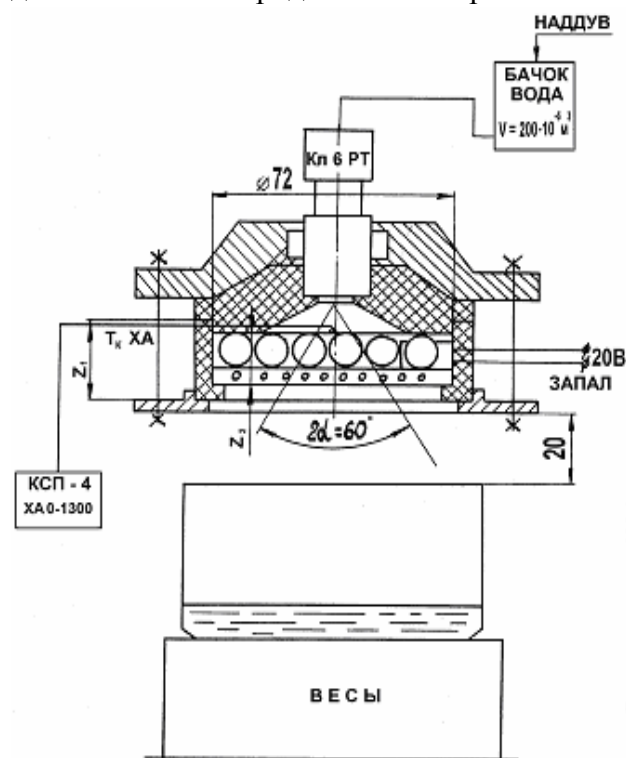


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка включала в себя ёмкость для дистиллированной воды, магистрали подачи и наддува, электроклапан, верхнюю крышку стендового ГГ с установленной в ней шнекоцентробежной форсункой, теплозащитный экран верхней крышки и стакан, из композитного материала, в котором размещались гранулированные засыпки. Гранулы из СВС составов опирались на решётки,

из вольфрамовых стержней диаметром 1 мм. Установка включала также ёмкость для сбора неиспарившейся жидкости, размещаемой на аналитических весах. Верхняя крышка ГГ и стакан стягивалась с помощью двух болтов в пакет, который устанавливался в стенок стенда. Гранулированные засыпки препарировались ХА терморпарой с диаметром сепя  $d_{сеп.} = 0,5$  мм, измеряющей температуру верхнего слоя на оси пакета.

Методика проведения экспериментов была следующей. Перепад давления подачи жидкости составлял 6.0 МПа. При этом средний секундный массовый расход  $\dot{m} = 0,064$  кг/с. Длительность включений была выбрана из условий обеспечения требуемой погрешности измерения количества неиспаренной жидкости. В стакан помещались гранулы до полного заполнения соответствующего количества слоёв. Высота теплозащитного стакана каждый раз выбиралась в соответствии с высотой заряда с тем условием, чтобы верхний слой вплотную примыкал к теплозащитному экрану верхней крышки. С помощью воспламенителя, помещаемого в засыпку гранул, производилось инициирование экзотермических химических реакций в гранулах. После выхода температуры верхнего слоя на установившееся значение производилось включение электроклапана подачи длительностью  $\tau_{вкл} = 0.2$  с. С помощью мерной ёмкости, расположенной на расстоянии  $h = 20$  мм от нижнего торца стакана, производился сбор капель, прошедших через засыпку. После выравнивания температуры гранульной засыпки и стабилизации температуры верхнего слоя, производилась замена мерной ёмкости и включение повторялось. Эксперименты проводились в диапазоне температуре верхнего слоя (300...1200)°С. Таким образом, сбор жидкости, неиспарённой при прохождении капель через засыпку, производился при ступенчато снижающейся температуре верхнего слоя и средней температуре всего ТА. После завершения цикла включений мерные ёмкости взвешивались, и определялась масса неиспарённой жидкости, прошедшей через гранулированную засыпку с известными габаритами, количеством слоёв, диаметрами гранул, массой и температурой. В экспериментах использовались неупорядоченные

засыпки из гранул со средними диаметрами 2,7 мм; 7,5 мм; 15 мм и количеством слоёв от одного до пяти. В экспериментах с гранулами  $\varnothing 2,7$  мм вместо количества слоёв измерялась и варьировалась высота засыпки, которая составляла  $h_1 = 7$  мм;  $h_2 = 18$  мм;  $h_3 = 27$  мм;  $h_4 = 33$  мм;  $h_5 = 37$  мм;  $h_6 = 50$  мм. Масса заполненных и пустых влагоборников определялась взвешиванием на аналитических весах, при этом относительная погрешность не превышала  $\delta_m = \pm 0,2\%$ .

Относительная погрешность определения среднего массового секундного расхода при гидравлических испытаниях форсуночного узла, обусловленная погрешностями измерения массы жидкости и времени, не превышала  $\delta \dot{m} = \pm 0,45\%$ . Время проливок определялось по электрическому секундомеру класса 0,4.

Результаты проведённых экспериментов после обработки представлялись в виде зависимости массовой доли испарённой жидкости при взаимодействии капельного факела воды с гранулированной засыпкой от температуры его верхнего слоя. Полученные зависимости иллюстрируют поведение экспериментальных зависимостей для засыпок из гранул одного размера и различного количества слоёв. На рис. 2 в качестве примера приводится зависимость доли испарённой жидкости от температуры верхнего слоя для гранул  $\varnothing 7,5$  мм и количества слоёв от одного до пяти. Различными видами штриховки и тонкими линиями на нём выделены области разброса параметров.

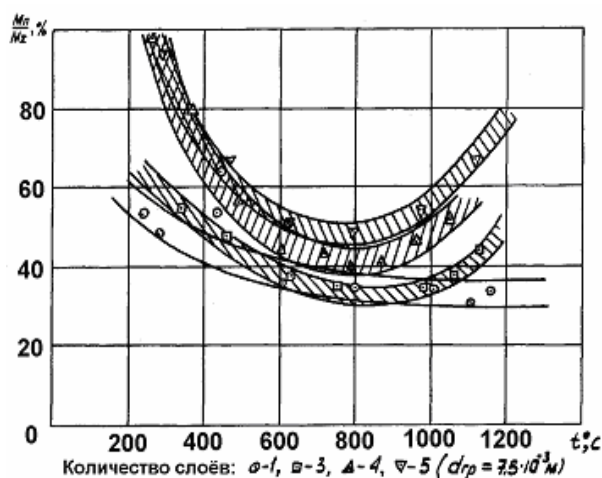


Рис. 2. Зависимость массовой доли испарённой жидкости от температуры верхнего слоя гранул и толщины засыпки

На рис. 3 показаны осреднённые экспериментальные зависимости доли испаренной жидкости от толщины гранульной засыпки для гранул различных размеров и построенные в данном случае для  $T = 1000^\circ\text{C}$ .

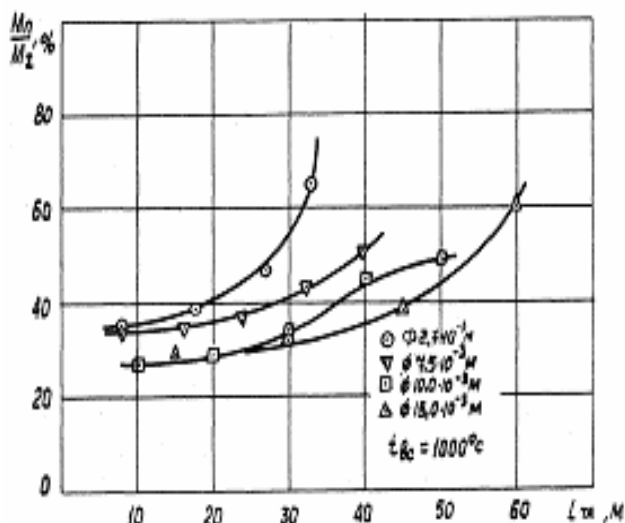


Рис. 3. Зависимость массовой доли испаренной жидкости от толщины гранульной засыпки

Анализ полученных результатов показывает следующее. Зависимость массовой доли испаренной жидкости от температуры верхнего слоя гранул, выраженная в процентах от суммарной массы жидкости, поданной за равный промежуток времени, имеет одинаковый характер для засыпок из гранул всех исследуемых размеров за исключением тонких в один и два слоя гранул малых диаметров:  $\varnothing 2,7$  мм;  $\varnothing 7,5$  мм. Характер полученных зависимостей массовой доли испаренной жидкости от температуры верхнего слоя имеет явно выраженный минимум, приходящийся на температуру верхнего слоя  $T_{\text{ср}} = (600 \dots 900)^\circ\text{C}$ . При более низких и более высоких температурах наблюдается существенное возрастание доли испаренной жидкости и, соответственно, уменьшение доли жидкости, прошедшей через засыпку. Увеличение количества слоёв засыпки приводит к увеличению доли испаренной жидкости. При этом минимум на них носит более явно выраженный характер, а крутизна ветвей в сторону больших или меньших температур увеличивается. С другой стороны. Более мелкие гранулы дают более высокие значения доли паровой фазы.

В ходе проведения экспериментов было отмечено, что на гранулах малых диаметров, особенно с диаметром 2,7 мм, наблюда-

лись значительные временные задержки выхода капель жидкости и пара из ТА, а сам процесс носил характер хлопка. Такой характер взаимодействия капельного факела с нагретой гранулированной структурой говорит о существенных изменениях, происходящих в структуре течения двухфазного потока по гранульной засыпке. Такие явления, квалифицируются в литературе как пульсирующий режим двухфазного потока при несмачиваемых гранулах, могут возникать вследствие формирования локализованного струйного или снарядного течения жидкости по центру пор, и возникающих в результате этого эффектов блокировки жидкостью наиболее узких пор между гранулами [2, 3].

Переход дисперсного режима течения двухфазного потока в область снарядного или стержневого возможен в результате коагуляции капель в поровом пространстве гранульной засыпки и захлаживания слоёв гранул. Гранульные засыпки из мелких гранул, обладающие существенно более узкими порами и повышенным гидросопротивлением, как показали эксперименты, наиболее склонны к таким явлениям.

В целом проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Взаимодействие капельно-жидкостного факела с нагретыми гранулированными структурами ТА, приводит к формированию двухфазного потока, проникающего на значительную глубину гранульной засыпки.

2. Увеличение толщины гранульной засыпки или количества её слоёв приводит к возрастанию массовой доли испаренной жидкости и возрастанию паросодержания двухфазного потока.

3. Течение двухфазного потока в гранульных засыпках из мелких гранул сопровождается значительными временами задержки прохождения потока и хлопками, что указывает на развитие в них процессов коагуляции и, вследствие этого, перехода течения в снарядный или струйный режим, сопровождающийся блокировкой жидкостью мелких пор. Течение же двухфазного потока в засыпках из крупных гранул происходит в основном в дисперсном режиме.

4. Гранульные засыпки из мелких гранул обладают при одинаковых габаритах с

засыпками из крупных гранул повышенной парогенерирующей способностью, однако это сопровождается качественно отличным характером течения в них двухфазного потока и значительными временными задержками в газификации жидкофазных продуктов.

Полученные данные, в том числе по температурным свойствам засыпки, в зависимости от размеров гранул, использовались для выбора конструктивных размеров импульсных ГГ для разложения НДМГ и определения режимных факторов.

### Список литературы

1. Мержанов А.Г. Теория безгазового горения. – Препринт. Черноголовка.: ИХФ АН СССР, 1973. – 23 с.
2. Пористые проницаемые материалы. / Под ред. С.В. Белова.- М.: Metallurgy, 1987. – 335 с.
3. Харламов А.Т. Теплопроводность засыпки керамической дроби // Инженерно-физический журнал. -1965, - т.9, №1 – с. 48 – 53.

## INTERACTION OF DROPS OF A PLUME OF A LIQUID WITH HEATED GRANULOUSE UNITS

© 2006 V.E. Nigoduk, A.U. Lykin

Samara State Aerospace University

In the article the experimental research of interaction of a dropwise plume of a liquid with heated granulouse fillings from pellets of the different sizes and bed depths is considered. The outcomes of experiments are represented by the way of relations of a mass share of a vaporized liquid to temperature of a high layer of a filling, width of a filling and sizes of pellets.