

РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОЙ СМЕСИ Ti+C В ПОТОКЕ АЗОТА ДЛЯ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ ГРАНУЛ

Сеплярский Б.С., Кочетков Р.А.[®], Лисина Т.Г., Абзалов Н.И.

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН, Черноголовка

numenor@list.ru

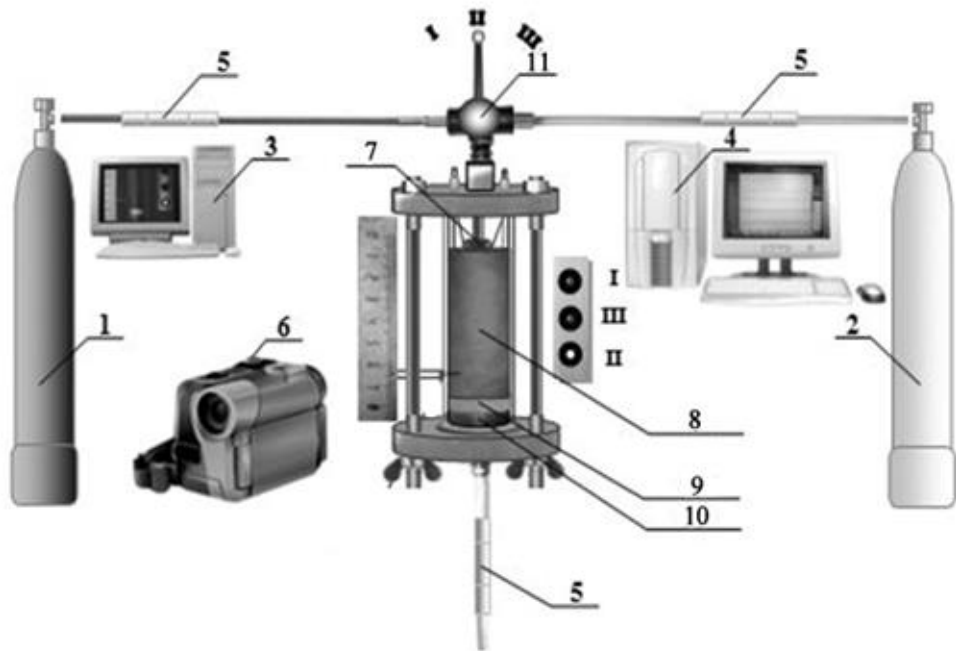
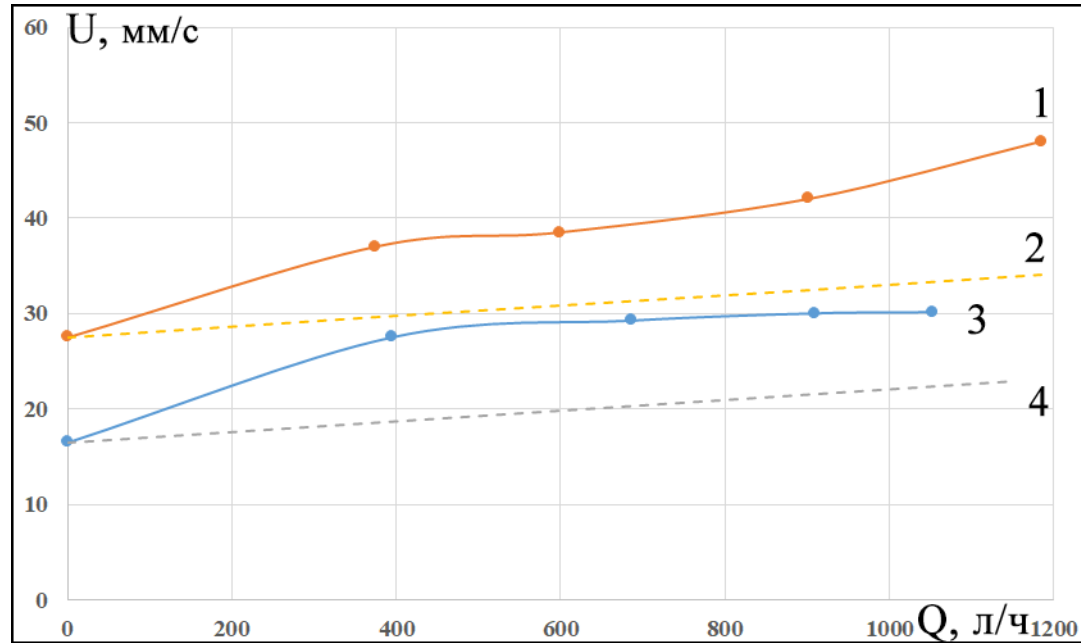


Схема экспериментальной установки: 1 – азот, 2 – аргон, 3 – компьютер для записи видеосигнала, 4 – компьютер для записи показаний датчиков, 5 – датчики расхода и давления, 6 – цифровая видеокамера, 7 – электрическая спираль, 8 – шихта, 9 – слой минеральной ваты, 10 – металлическая сетка, 11 – переключатель газа

Исследование СВС гранулированных систем Ti+xC показало, что в потоке азота уже при избыточном давлении 1 атм может наблюдаться конвективный режим горения, который сменяет кондуктивный, предполагающей полный прогрев смеси в волне горения. В конвективном режиме поток активного газа поджигает с поверхности гранулы, обеспечивая более высокую скорость горения, чем следует из расчетов по теории фильтрационного горения, и чем наблюдается в потоке инертного газа. Ранее показано, что величина потока азота на границе перехода между режимами горения зависит от величины скорости горения смесей Ti + xC в отсутствие потока газа. А реализация конвективного режима горения зависит от значения температуры зажигания, то есть от соотношения глубины прогрева к моменту зажигания и размера гранул. В соответствии с этим, увеличение размера гранул должно способствовать переходу в конвективный режим горения.

Изучение закономерностей горения выполнялось на оригинальной экспериментальной установке. Установка позволяет проводить синтез как без продува, так и при продуве газовым потоком, измерять расход и давление газа в процессе горения, а также получать видеозаписи процесса горения. На основании покадровой обработки видеозаписей рассчитывается скорость фронта горения. Для исключения усадки несгоревшей части засыпки в процессе горения и получения стабильных результатов перед каждым экспериментом шихту продували потоком аргона

В настоящей работе ряд экспериментов проводился без потока газа, часть в потоке азота. При синтезе в потоке азота давление варьировалось от 0,25 до 1 избыточной атмосферы с шагом 0,25. При этом расход газа через реактор при 1 атмосфере составлял ~ 1050-1185 л/ч в зависимости от размера гранул.



Скорости горения смеси Ti+C в зависимости от величины потока газа. Эксперимент: горение в потоке азота (1) $d=1,7$ мм и (3) $d=0,6$ мм.

Расчет в потоке азота по теории фильтрационного горения: (2) $d=1,7$ мм, (4) $d=0,6$ мм.

Линии (2, 4) показывают результаты расчета скорости горения в потоке азота по теории фильтрационного горения (ТФГ), предполагающей полный прогрев гранулированной смеси во фронте горения (кондуктивный режим). В соответствии с ней, скорость фронта в спутном потоке газа можно представить в виде:

$$U(Q) = U(0) + \Delta U = U(0) + c_g \rho_g \cdot Q / (s \cdot c_s \rho_s) \quad (1)$$

где $U(0)$ – скорость фронта горения в отсутствие потока газа, Q – объемный расход газа через сечение образца s , ρ_g – плотность газа, c_g – удельная теплоемкость втекающего газа, c_s – удельная теплоемкость пористого вещества, ρ_s – насыпная плотность смеси.

В работе использованы следующие данные: $c_g = 1215$ Дж/(кг·К), $\rho_g = 1,25$ кг/м³, а также значения $c_s = 560$ Дж/(кг·К) и экспериментально измеренные значения $\rho_s = 680$ кг/м³, $s = 2$ см²

Из приведенных на графике данных видно, что в отсутствие потока газа ($Q=0$) при увеличении среднего размера гранул d_g с 0,6 до 1,7 мм скорость горения смеси возрастает с 16 до 27 мм/с. Для объяснения этого эффекта будем считать, что полное время прохождения фронта горения по засыпке складывается из времени сгорания вещества гранул и времени передачи горения от гранулы к грануле. Полагаем, что скорость горения вещества гранул v_g и время перехода горения от гранулы к грануле t_p не зависят от размеров гранулы. Решая систему уравнений вида:

$$U_s = \frac{d_g \cdot \mathcal{G}_g}{d_g + \mathcal{G}_g \cdot t_p} \quad (2) \quad \text{где } U_s \text{ – наблюдаемая скорость горения смеси, } d_g \text{ – средний размер гранул}$$

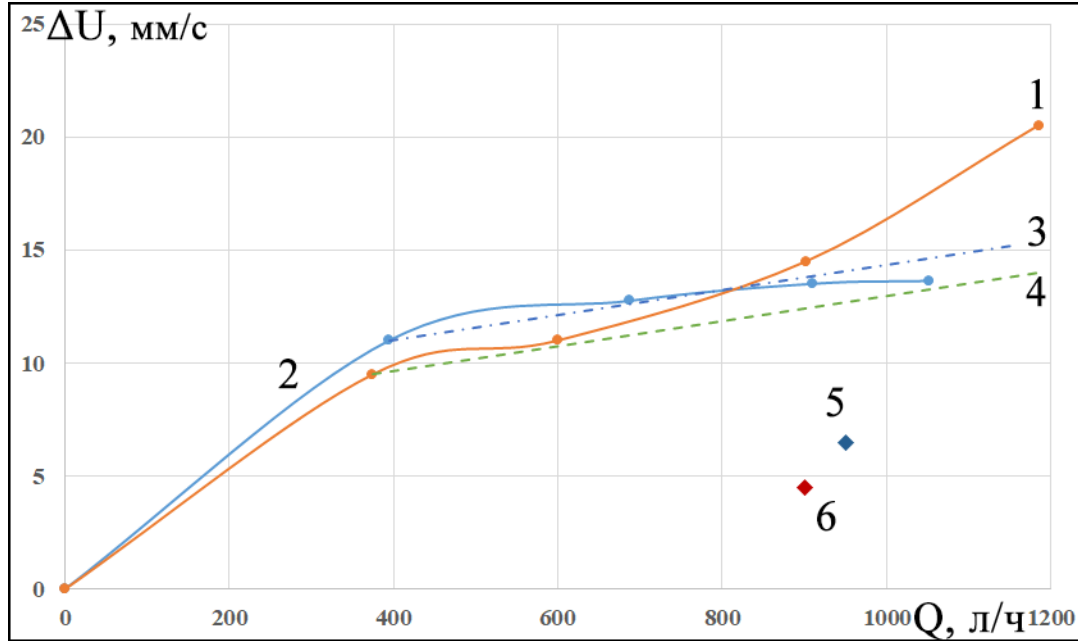
$$\text{Получаем: } v_g = 43 \text{ мм/с, } t_p = 2.36 \cdot 10^{-2} \text{ с}$$

Для верификации полученных данных, рассчитаем значение скорости горения U смеси средней фракции с $d = 0,9$ мм:

$$U = \frac{d_g \cdot \mathcal{G}_g}{d_g + \mathcal{G}_g \cdot t_p} = \frac{0.9 \text{ мм} \cdot 43 \text{ мм/с}}{0.9 \text{ мм} + 43 \text{ мм/с} \cdot 2.36 \cdot 10^{-2} \text{ с}} = 20.3 \text{ мм/с}$$

Полученное значение отличается от среднего экспериментального значения (22 мм/с) на 7%, что меньше экспериментального разброса (10%)

Сопоставим время зажигания гранул $t_p = 2.36 \cdot 10^{-2}$ с со временем сгорания одной гранулы $t^* = d_g/U$ для разных фракций. Для фракции с более мелкими гранулами ($d_1 = 0,6$ мм) время зажигания больше времени сгорания гранулы ($1.44 \cdot 10^{-2}$ с), для крупных гранул ($d_3 = 1,7$ мм) – меньше времени сгорания ($4.06 \cdot 10^{-2}$ с), для средних ($d = 0,9$ мм) время зажигания и время сгорания гранулы ($2.15 \cdot 10^{-2}$ с) близки.



Прибавки скорости горения смеси Ti+C в зависимости от величины потока газа.

Эксперимент: горение в потоке азота (1) $d=1,7$ мм и (2) $d=0,6$ мм; горение в потоке аргона (5) $d=1,7$ мм, (6) $d=0,6$ мм.

Расчет в потоке азота по формуле (1) при различных начальных значениях прибавки скорости: (3) $d=0,6$ мм, (4) $d=1,7$ мм.

Видно, что наиболее резкий прирост скорости горения приходится на область $0 < Q < 350-400$ л/ч (перепад давлений 0,25 атм).

Эффектом поджатия засыпки газом наблюдаемые результаты объяснить нельзя, т.к. в потоке аргона даже при значительно больших расходах и давлениях газа скорости горения значительно ниже (точки 5 и 6). Предположим, что такое увеличение скорости горения при малых потоках азота происходит за счет уменьшения времени зажигания гранул, т.к. в таком случае воспламенение в точке контакта гранул возможно при температуре α - β перехода титана (883 °C).

Решая уравнение (2) для наблюдаемых в потоке азота скоростей горения, получаем время перехода (зажигания) $t_p = 8.04 \cdot 10^{-3}$ с, что в 3 раза меньше, чем получилось в отсутствии потока газа.

За областью быстрого прироста скорости при низких потоках азота, кривые зависимости прироста скорости для мелких и крупных гранул ведут себя по-разному. Для мелких гранул прирост скорости горения от величины потока азота коррелирует с расчетными прибавками по формуле (1) (кривые 2 и 3). Это совпадение позволяет сделать вывод о реализации кондуктивного режима горения для мелких гранул.

Для крупных гранул совпадение расчетных по формуле (1) и экспериментальных прибавок скорости горения наблюдается при расходах азота до 600 л/ч. При $Q > 600$ л/ч экспериментальные прибавки скорости начинают превышать расчетные. Сильное увеличение скорости горения указывает на реализацию конвективного режима горения.

Для оценки скорости горения крупных гранул в области $Q > 600$ л/ч в конвективном режиме формулу (1) можно модифицировать следующим образом:

$$U_{conv} = c_g \cdot \rho_g \cdot Q / (S \cdot c_s \cdot \rho_s \cdot K) \quad (3)$$

здесь $K = 3h/r$ – характеризует отношение объема прогретого слоя к полному объему гранулы в волне конвективного горения при $h \leq r$, $r = d/2$, остальные обозначения те же, что и в формуле (1). Экспериментальная скорость горения смеси с $r = 0.85$ мм при $Q = 1185$ л/ч равна **48 мм/с**. Подставляя экспериментальное значение скорости в формулу (3), получим $h = 0,04$ мм $\ll 0,85$ мм, что подтверждает конвективный характер горения этой фракции при больших Q . Зная глубину прогрева $h = 0,04$ мм, по формуле (3) можно рассчитать предполагаемую скорость горения мелких гранул $r = 0,3$ мм в конвективном режиме при том же расходе газа: $U_{conv} = 16,5$ мм/с. Как экстраполированная экспериментальная ($U = 30,1$ мм/с при $Q = 1053$ л/ч), так и расчетная по формуле (1) скорости горения намного выше расчетной конвективной. Значит, в мелкой гранулированной смеси реализуется фильтрационный (кондуктивный) режим горения.