

О СТАБИЛИЗАЦИИ ФРОНТА ГОРЕНИЯ В ПРОТОЧНОМ СВС РЕАКТОРЕ

А.П. Алдушин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия
analdushin@mail.ru

Основу технологии получения материалов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) составляет процесс сжигания порошков в замкнутых реакторах периодического действия [1,2]. Полный цикл работы такого реактора включает несколько последовательных стадий, в ряду которых, как, собственно, синтез, так и ряд вспомогательных время затратных операций – загрузка, охлаждение, выгрузка, очистка реактора. Наряду с периодическими реакторами, в химической технологии широко используются реактора непрерывного действия, более эффективные по сравнению с периодическими, при наработке больших партий продукта. Эти реактора представляют собой устройства открытого типа с постоянной подачей реагентов на входе и оттоком продуктов на выходе из реактора. В настоящей работе рассматривается вопрос о принципиальной возможности реализации процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза порошковых материалов в реакторах непрерывного действия. В отличие от изотермических процессов химического синтеза с непрерывной конверсией вещества по ходу его движения в канале реактора, процессы СВС протекают в автоволновом фронтальном режиме при котором образование продуктов происходит в сравнительно узкой зоне горения, распространяющейся со скоростью U навстречу потоку реагентов.

Схематическое представление процесса СВС в проточном реакторе показано на рис.1. Подача шихты (1) из бункера (2) в трубчатый реактор осуществляется с помощью винтового шнека (4), управляемого электроприводом (3). В начале процесса реактор заполняется реакционной шихтой, после чего производится инициирование волны горения, бегущей по неподвижной шихте. Для реализации стационарного режима работы реактора необходимо стабилизировать фронт реакции внутри реактора путем встречной подачи шихты. Вопрос о горении в потоке реагента, впервые поставленный Я.Б.

Зельдовичем[3], рассматривался в ряде работ [4,5]. Было показано, что при подаче реагирующей смеси со

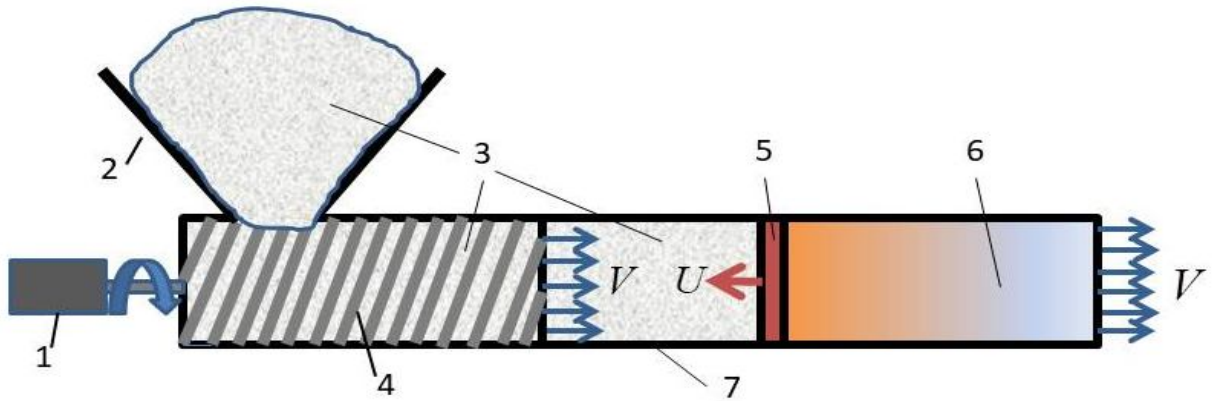


Рис.1. Принципиальная схема проточного СВС реактора непрерывного действия.

1 – электропривод винтового шнека, 2 – бункер, 3 – шихта, 4 – шнек,
5 – зона горения, 6 - продукты синтеза, 7 - стенки реактора.

скоростью V меньшей нормальной скорости горения U , зона реакции стабилизируется на некотором расстоянии X_f от входа в реактор. В приближении узкой зоны реакции величина X_f определяется выражением:

$$(1) \quad X_f = L_0 \frac{U}{V} \ln\left(1 - \frac{Z}{2 \ln(V/U)}\right).$$

Здесь $L_0 = \chi / U$ - ширина прогреваемого слоя в бегущей волне горения, χ - температуропроводность шихты, Z - число Зельдовича.

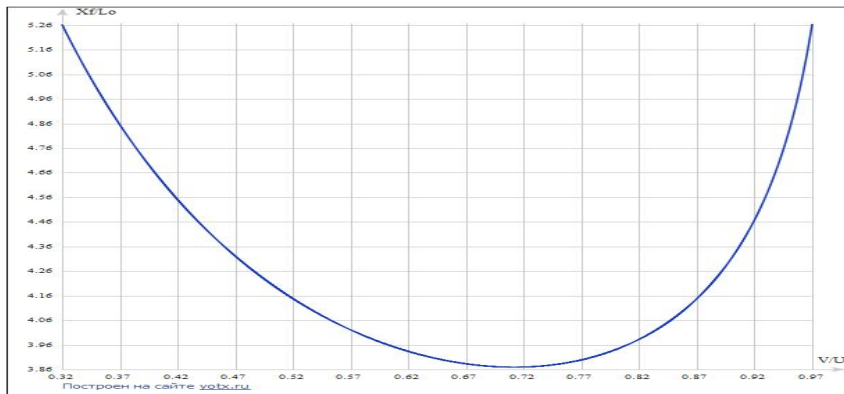


Рис.2. Зависимость расстояния фронта горения от входа в реактор от скорости подачи шихты.

Функция $X_f(V)$ имеет немонотонный характер. При численном моделировании удается воспроизвести лишь одну – возрастающую ветвь зависимости координаты фронта от скорости потока реагирующей смеси. При уменьшении скорости потока ниже порогового значения, соответствующему минимуму на кривой $X_f(V)$ режим горения не поддерживается.

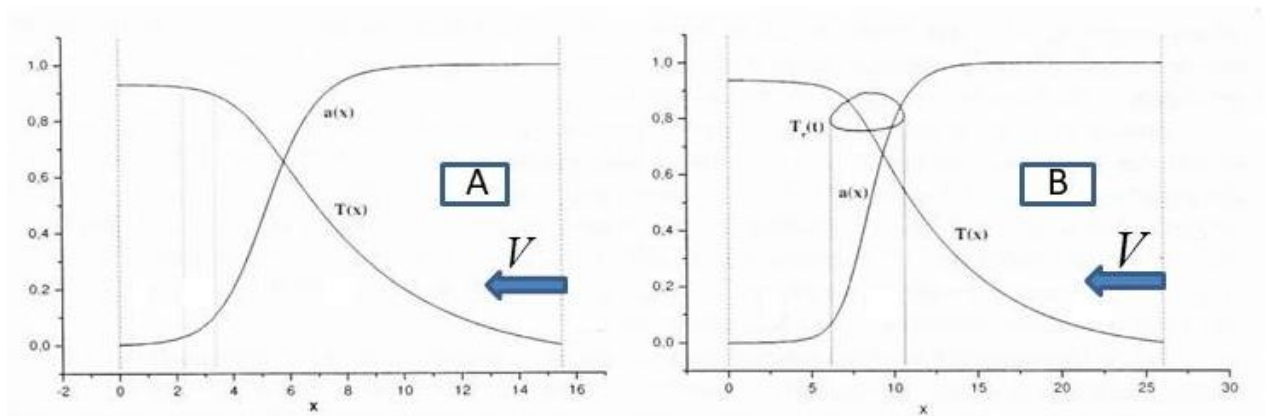


Рис.3. Распределение мгновенных значений концентрации горючего $a(x)$ и безразмерной температуры $T(x) = (T_2 - T) / (T_2 - T_0)$ в реакторе. А – стационарный режим, В – автоколебательный. Кривая $T_r(t)$ показывает изменение температуры в точке максимума скорости тепловыделения.

На рис.3 показаны распределения температуры и концентрации реагента в реакторе, полученное в результате решения нестационарной задачи о протекании процесса СВС в условиях проточного реактора с фиксированной температурой ($T = T_0$) смеси на входе в реактор. В зависимости от значений определяющих параметров, могут реализоваться стационарный режим с не меняющимся во времени распределением величин или автоколебательный режим с осциллирующими значениями температуры, концентрации и координаты зоны реакции.

Приближенная оценка (1) и численные расчеты показывают, что для стабилизации зоны реакции вблизи входа длина реактора должна превышать некоторый критический размер порядка ширины зоны горения, а скорость подачи шихты быть меньше, чем скорость распространения фронта реакции по неподвижной смеси. Практическая реализация режима стабилизации зоны горения вблизи входа в реактор сильно затруднена, поскольку предполагает поглощение теплового потока из зоны реакции в свежую смесь неким охлаждающим агентом. Более реалистичным является вариант фиксации зоны горения в глубине реактора на расстояниях существенно превосходящих ширину зоны горения, не требующий охлаждения втекающего реагента. Однако, в данном случае необходимо использовать специальное устройство, обеспечивающее стабилизацию зоны горения. Вариантом такого устройства может быть система, поддерживающая постоянство температуры в заданной точке реактора путём регулирования скорости подачи шихты V в реактор. На рис.4 представлены результаты численного моделирования процесса СВС в проточном реакторе в условиях корреляции потока V со значением температуры T в заданной точке x_* реактора.

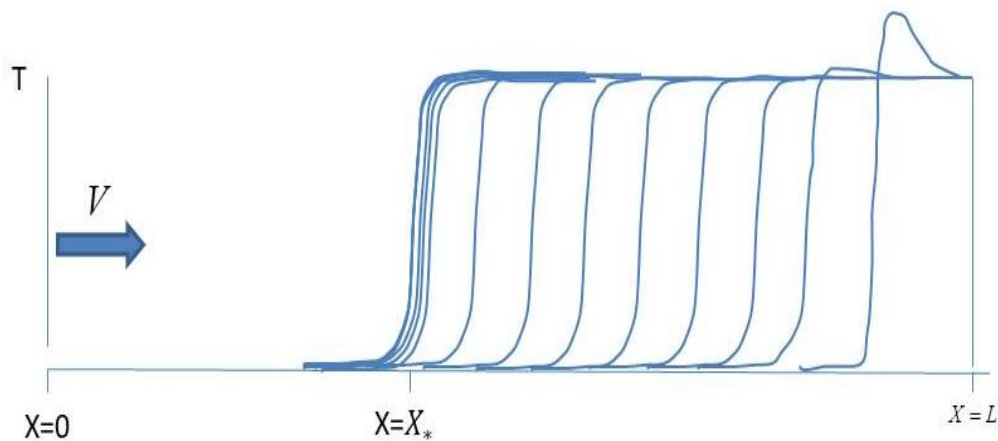


Рис.4. Температурное поле в реакторе вытеснения при стабилизации зоны синтеза посредством корреляции скорости подачи шихты V и значения температуры в заданной точке X_* реактора.

Началом процесса ($t = 0$) является подача поджигающего импульса на выходе из реактора ($x = L$), инициирующего распространение волны реакции по неподвижной шихте, заполняющей реактор. В момент времени $t = t_*$ датчик, установленный на выбранном расстоянии X_* от входа в реактор, фиксирует повышение температуры $T(X_*)$ до выбранного (близкого к T_0) значения T_* и включается подача шихты со скоростью $V_* = L / t_*$. В дальнейшем скорость подачи V увеличивается при повышении температуры $T(X_*)$ или уменьшается в случае её понижения по заданному алгоритму. В результате удается стабилизировать зону горения в окрестности выбранной точки $x = X_*$, как в случае стационарного так и автоколебательного режимов распространения волны реакции. Предложенная схема стабилизации не является единственно возможной, но представляется вполне реалистичным вариантом организации непрерывного процесса СВС в проточном реакторе вытеснения.

Литература

- [1] В.К.Прокудина, В.И.Ратников, В.М.Маслов, И.П.Боровинская, А.Г. Мержанов, Ф.И.Дубовицкий, Процессы горения в химической технологии и металлургии, под ред.А.Г.Мержанова, Черноголовка, 1975, с.290.
- [2] Е.А. Левашов, А.С.Рогачев, В.В.Курбаткина, Ю.М.Максимов, В.И.Юхвид, Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза., МИСиС, Москва, 2011, с.378.
- [3] Р.М.Зайдель, Я.Б.Зельдович. Жур. Прикладной механики и технической физики, 4,(1962), с.27.
- [4] А.Г. Мержанов, Б.И.Хайкин. Теория волн горения в гомогенных средах, Черноголовка,1992, с 160.
- [5] Б.И. Хайкин, Э.Н. Руманов, Физ.гор. и взрыва, 11, (1975) с.671