

УДК 665.65.541.15

О. С. НУРСУЛТАН

НЕКОТОРЫЕ ОБОБЩЕННЫЕ КРИТЕРИИ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

Интенсивное развитие промышленного производства полимерных материалов требует создания экономически эффективных способов получения этилена, ацетилена и пропилена – важнейших исходных продуктов для синтеза целого ряда мономеров (винилхлорида, хлоропрена, акринитрила и т.п.).

Принципиально новым технологическим и экономически эффективным методом получения мономеров, технического водорода и дисперсного углерода является плазмохимический пиролиз углеводородов в низкотемпературной плазме.

В последние годы плазмохимия оформилась в самостоятельную науку: возникли теоретическая плазмохимия – новый раздел химии и плазмохимическая технология – новая область промышленной технологии.

Использование такой плазмы приводит к значительному увеличению скоростей химических реакций и, как следствие, к резкому росту производительности химических реакторов при одновременном уменьшении их габаритов.

Плазмохимические процессы проходят в существенно неизотермических и неравновесных условиях, и механизм их протекания в большинстве случаев неизвестен. Температура в реакторе меняется как вдоль него, так и в радиальном направлении в связи со значительными тепловыми эффектами процессов и теплопереносом в реакционной зоне. Плазменный поток перемещивается с холодным реагентом, вследствие чего процессы смешения, тепло и массообмена, и химическая реакция происходит одновременно. Тем самым осложняется точное математическое описание всех процессов, происходящих в реакторе. Поэтому назревает необходимость использования упрощенных моделей и эмпирических выражений, позволяющих с достаточной для практики точностью проектировать и рассчитать промышленные плазмохимические установки. При этом с целью уменьшения числа параметров процесса наряду с известными обобщенными переменными – Re , St , Pr и др., расчетные зависимости строят с использованием обобщен-

ных критериев и чисел подобия характеризующие особенности плазмохимических процессов как $K_{эн}$ – энергетический критерий, γ_i – степень превращения сырья в отдельные продукты, Δ – общая степень превращения сырья и др.

В работах ряда авторов [1-3] на основании анализа дифференциальных уравнений предлагаются обобщенные критерии характеризующие подобие физико-химических процессов. Эти критерии включают текущие значения концентраций компонентов или скоростей химических реакций и параметров потока вдоль реактора и требуют знания механизма процесса, что затрудняет использование их для расчета промышленных плазмохимических аппаратов. Для характеристики температурного уровня в электроразрядных реакторах предлагается размерный комплекс $W_{пл} / V_{пл}$ – отношение мощности разряда к расходу плазмообразующего газа. Однако этот размерный комплекс может быть использован для обобщения экспериментальных данных, полученных лишь для одного вида сырья и для данного реактора.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является исследование влияния конструктивных параметров, а также вида используемого сырья на процесс пиролиза с последующим критериальным обобщением показателей процессов, имеющих важное значение для разработки научных основ расчета и проектирования промышленных установок получения этилена, ацетилена, синтез-газа (оксида углерода и водорода) и дисперсного углерода.

В работе [4] предлагается энергетический критерий $K_{эн}$, представляющий собой отношение энергии, требуемой для осуществления плазмохимического процесса W_n , к энергии, необходимой для полного превращения исходного сырья в целевые продукты при стандартных условиях $Q_{сн}$ и характеризующий температурный уровень протекания процесса и состав сырья. Принимая в качестве основного показателя плазмохимического процесса энергетический критерий $K_{эн}$ можно будет строить зависимости для расчета

и проектирования промышленных плазмохимических реакторов, так как он учитывает и энергию вложенную в процесс и состав используемого

сырья, $K_{эн} = \frac{W_n}{V_c \cdot Q_{с,нi}}$, где V_c расход сырья.

Для обобщения результатов плазмохимического пиролиза углеводородов были использованы как данные, полученные нами на лабораторной установке и данные [5–7], а также результаты, полученные на опытно – промышленных установках мощностью 200 кВт, 1 МВт [12, 13].

Ранее нами [8] было получено эмпирическое соотношение $K_{эн} \cdot (l/d)^{0,7}$ описывающее экспериментальные данные по пиролизу углеводородов в плазмохимическом реакторе с охлаждаемыми стенками. Однако, при сопоставлении данных, полученных нами и в [4] оказалось, что показатели процесса не описываются однозначно введенным нами критерием $K_{эн} \cdot (l/d)^{0,7}$.

По-видимому, на показатели процесса кроме $K_{эн} \cdot (l/d)^{0,7}$ влияют и другие параметры реактора, а именно число “n” и сечение отверстий для ввода сырья (S_n) и канала реактора S_k .

Действительно, введение комплекса $K_{эн} \cdot (l/d)^{0,7} / (nS_n / S_k)^n$, где учтены конструктивные особенности всех исследованных нами и другими авторами реакторов, позволяет однозначно определить показатели процесса $\gamma_{сiнiи} \Delta$.

Из анализа полученных результатов было найдено следующее эмпирическое уравнение, которое удовлетворительно описывает все наши экспериментальные данные и данные [4]

$$\gamma_i = A \cdot K_{эн} \left(\frac{S_k}{nS_n} \right)^{0,5} (l/d)^{0,7}, \quad (1)$$

где $A = 1,26 \pm 0,14$.

Как было отмечено ранее при пиролизе углеводородов в реакторах с различными геометрическими параметрами теплопотери на стенках реактора будут различными, а следовательно различны показатели процесса при прочих равных условиях.

В нашем случае физические константы определялись при среднемассовой температура потока газа в реакторе и температуре стенки. Коэффициент теплопроводности ($\lambda_{см}$) для смеси газов определялись по формуле Брокау [9]. Теплоемкость смеси ($Cp_{см}$) рассчитывалась согласно данным [10]. Динамический коэффициент вязкости ($\mu_{см}$) для смеси определялся по формуле Андрусова [10].

Для нахождения зависимости величины теплопотерь в реакторе от различных параметров (длины реактора – l , диаметра канала реактора – d , линейной скорости – ω_r , среднемассовой температуры газовой смеси – T_p) был проведен анализ экспериментальных данных работы [4] и наших в которых эти показатели изменялась от 1 до

15 квт, отношение l/d – от 2 до 17 для диаметров канала реактора 3; 6; 10; 7; 12,4мм, диаметр отверстия для ввода сырья в реактор – от 0,5 до 1 мм, расходы газов – от 1,5 нм³/ч до 4 нм³/ч.

На основании полученных зависимостей критерий Стентона – теплоперенос на стенки реактора определяется следующим эмпирическим уравнением:

$$St = 1,19 (d/l)^{0,1} Re^{-0,5} Pr^{-0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где Pr_w – критерий Прандтля рассчитанный при температуре стенки реактора. С другой стороны [11] критерий Стентона может быть представлен в виде

$$St = \frac{W_{nl} d}{W_n 4l}. \quad (3)$$

Из совместного рассмотрения двух уравнений (2) и (3) можно определить значение теплопотерь на стенках реактора:

$$W_{np} = 4,11 (l/d)^{0,3} Re^{-0,5} Pr^{-0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} W_{nl}, \quad (4)$$

обозначив $P = 4,77 (l/d)^{0,3} Re^{0,5} Pr^{-0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}$,

учитываем $W_{nl} = W_n + W_{np}$.

Если учесть влияние конструктивных параметров, а именно диаметры канала реактора и

отверстий для ввода сырья, приняв в качестве определяющих некоторые эффективные площади сечения, равные, соответственно, сумме площадей всех каналов и отверстий для ввода сырья, т.е. $S_{\kappa}^{\text{эфф}} = nS_{\kappa}$, где n -число каналов, аналогично $S_{\text{в}}^{\text{эфф}} = nS_{\text{в}}$, где n -число отверстий для ввода сырья.

Полученные зависимости позволяют оценить влияние отдельных параметров (энергетических $K_{\text{эн}}$, конструктивных особенностей реактора – l , d , $d_{\text{в}}$, n , а также вида используемого сырья) на показатели процесса пиролиза (Δ , $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_2}$, $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_4}$) и др.

Эти зависимости для всех рассмотренных видов сырья и параметров реакторов описываются следующей эмпирической формулой:

$$\gamma_i = q^{-0,5} K_{\text{эн}} (1 - P) \left(\frac{S_{\kappa}^{\text{эфф}}}{nS_{\text{в}}^{\text{эфф}}} \right)^{0,5} \left(\frac{l}{d_{\text{эфф}}} \right)^{0,7}, \quad (5)$$

где $q = \frac{\rho_{\text{с}} \mathcal{G}_{\text{с}}^2}{\rho_{\text{пл}} \mathcal{G}_{\text{пл}}}$ – $\rho_{\text{с}}$, и $\rho_{\text{пл}}$ – плотности потоков сырья и плазмы в момент введения их в реактор, а $\mathcal{G}_{\text{с}}$ и $\mathcal{G}_{\text{пл}}$ – их линейные скорости;

$P = f(\text{Re}, \text{Pr})$ – постоянная связанная с теплопотерями в реакторе определяемая эмпирически.

Таким образом, найдены зависимости, описывающие процесс пиролиза углеводородов в плазмохимическом реакторе и обобщены многочисленные экспериментальные данные, полученные как в исследованиях наших и других авторов, а также данные полученные на опытно-промышленных установках.

Полученные показатели пиролиза различного углеводородного сырья позволяют провести оценки оптимальных параметров процесса, и плазмохимических реакторов и учета их при проектировании промышленных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абаев Г.Н.* Некоторые вопросы математического моделирования химических реакторов // Моделирование химических процессов и реакторов: Докл. IV Всесоюз. конф. по хим. реакторам. Новосибирск, 1971. Т. I. С. 65-71.

2. *Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А.* Электродуговые нагреватели газов (плазмотроны). М., 1973. 212 с.

3. *Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П.* Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М., 1974. 282 с.

4. *Сурис А.Л.* Плазмохимические процессы и аппараты. М., 1989. 304 с.

5. *Барков А.П., Зубкова К.А., Ковынев В.П.* Результаты разработки технологии и аппаратного оформления плазмохимического процесса получения ацетилена из природного газа на опытно-промышленной установке мощностью 1 МВт: Тез. докл. II Всесоюз. совещ. по плазмохим. Технологии аппаратостроения. М., 1977. Т. I. С. 231-233.

6. *Володин Н.Л., Зубаиров В.Р., Рудзит Р.Р.* и др. Исследование плазмохимического реактора для пиролиза бензина // Химия высоких энергий. 1975. Т. 9, №5. С. 423-426.

7. *Зубкова К.А., Васюкова Г.Г., Каминская О.В., Марцевой Е.П.* Исследование процесса смешения в плазмохимических реакторах для синтеза ацетилена из природного газа // Хим. технология. 1972. № 6. С. 16-19.

8. *Нурсултанов О.С.* Некоторые закономерности плазмохимического пиролиза углеводородов // Вопросы теоретической и прикладной физики. Алма-Ата, 1978. 201 с.

9. *Бретинайдер Е.* Свойства газов и жидкостей. М.: Химия, 1966. 288 с.

10. *Мищенко К.П., Равдельс А.А.* Краткий справочник физико-химических величин. М.: Химия, 1972. 250 с.

11. *Троцкий В.Н., Смородин А.И., Шорин С.Н.* Экспериментальное исследование тепло-и массопереноса в плазменной струе // Явления переноса в низкотемпературной плазме. Минск, 1969. С. 149-156.

12. *Нурсултан О.С.* Кинетика и механизм плазмохимического пиролиза углеводородов в условиях турбулентного смешения реагента с плазмой // Вестник Актауского государственного университета им. Ш. Есенова, 2002. №1. С. 68.

13. *Сериков Т.П., Нурсултан О.С.* и др. Получение нестабильного углеродного материала в процессе высокотемпературного пиролиза углеводородов // Нефть и Газ Казахстана. 2006. №5. С. 178.

Резюме

Көмірсутектерді плазмохимиялық реакторларда пиролиздеу кезінде процестердің жалпыланған критерийлері алынып, өндірістік ірі реакторлар жобалау үшін алғышарттарға керек мағлұматтар көрсетілген.

Summary

The article considers the generalized criteria of plasma-chemical processes, which are able to estimate the industrial reactor's parameters by their designing.

Атырауский институт нефти и газа, г. Атырау

Поступила 2.03.08г.