

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИНЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ КОНВЕРСИОННЫХ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

СЕМЕНОВ В.К., д-р техн. наук

**Представлена методика определения длины активной зоны конверсионных плазмохимических реакторов на основе стримерной короны, фронтальных волн ионизации и барьерного разряда.**

*Ключевые слова:* конверсионные плазмохимические реакторы, активная зона, стримерная корона, фронтальные волны ионизации.

## CONVERSION PLASMA-CHEMICAL REACTOR CORE REGION LENGTH FORECASTING

V.K. SEMEONOV, Ph.D.

**The work represents the method of determining conversion plasma-chemical reactor core region length on the base of streamer crown, ionization frontal waves and barrier discharges.**

*Key words:* conversion plasma-chemical reactor, core region, streamer crown, ionization frontal waves.

Защита окружающей среды от токсичных газообразных примесей во всем мире представляет собой важную экологическую проблему. Наиболее распространенными являются технологии очистки, основанные на использовании сорбционных, каталитических и термических процессов. Общими недостатками названных методов являются их неуниверсальность, высокая энергоемкость, крупные габариты газоочистного оборудования и значительные потери в окружающую среду. Все это приводит к тому, что защита атмосферы от оксидов серы и азота, содержащихся в дымовых газах ТЭС, в настоящее время в основном осуществляется рассеиванием их дымовыми трубами высотой 180, 250 и даже 320 м. Такой подход ни в коей мере не является радикальным решением проблемы. В последние годы продолжают интенсивные исследования по поиску и разработке новых более эффективных технологий. Большие возможности здесь открываются на основе использования методов химии высоких энергий, в частности плазмохимии [1, 2].

В любом плазмохимическом реакторе зарождается целый каскад разнообразных плазмохимических превращений, в основе которых лежат, строго говоря, взаимосвязанные между собой электрофизические, физико-химические, газодинамические и теплофизические процессы. Целью исследования этих процессов является определение оптимальной геометрии активной зоны реактора и оптимальных режимов его работы. При этом уровень описания должен позволять по заданному составу газов на входе в аппарат, энергозатрату и теплоотводу от аппарата предсказать состав газов на выходе из него. Сложность выбора адекватной математической модели, в первую очередь, связана с механизмом подвода энергии, а также многоканальностью и обилием плазмохимических реакций. Энер-

гозатрат в газ осуществляется во время отдельных импульсов напряжения, когда объем активной зоны заполняется большим количеством разветвленных стримеров. При этом их количество, степень заполнения разрядного промежутка, пространственная локализация, геометрия и переносимый заряд от импульса к импульсу меняются случайным образом. Во время распространения отдельного стримера на его фронте в области высокой напряженности поля за счет электронно-колебательного возбуждения молекул электронными ударами происходит рождение химически активных частиц и свободных радикалов, которые, взаимодействуя с вредными примесями, обеспечивают их деструкцию. Причем плазмохимические реакции протекают как во время приложения импульса напряжения в активной фазе разряда, так и во время паузы в режиме послесвечения.

Для оценки длины активной зоны реактора примем предположение о том, что стримеры, а также химически активные частицы равномерно распределены по объему зоны. Кроме того, реальный многоканальный процесс химических превращений компоненты, подлежащей конверсии, аппроксимируем некоторым модельным уравнением чистой гибели

$$\operatorname{div}(n\vec{v} - D\nabla n) = -k(T_v)n^m, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация молекул;  $D$  – коэффициент диффузии;  $k$  – константа скорости реакции;  $m$  – формальный порядок химической реакции (редко бывает выше третьего).

Ради определенности далее анализ будем вести для плоскопараллельного движения

$$\frac{\partial(nu)}{\partial x} + \frac{\partial(nv)}{\partial y} - D\left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2}\right) = -kn^m. \quad (2)$$

Для реакторов с большим расходом газа (реакторы импульсной короны, фронтальных волн ионизации) диффузией частиц вдоль га-

зового потока можно пренебречь, по сравнению с направленным движением:

$$\frac{\partial(nu)}{\partial x} + \frac{\partial(nv)}{\partial y} - D \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = -kn^m. \quad (3)$$

Граничными условиями задачи задаются концентрация компонента на входе в реактор  $n = n_0$  и отсутствие потока частиц через боковые стенки реактора. Так как нас интересует зависимость концентрации частиц от продольной координаты реактора, то найдем приближенное решение исходного уравнения методом интегральных соотношений. Для этого проинтегрируем уравнение (3) поперек разрядного канала. С учетом граничных условий задачи имеем

$$\frac{d}{dx} \int_0^1 n u dy = -b \int_0^1 n^m dy, \quad (4)$$

где  $b = \frac{h^2 k n_0^{m-1}}{v}$  – безразмерный параметр.

Уравнение (4) записано в безразмерном виде. В целях упрощения обозначений безразмерные величины обозначены теми же символами, что и размерные. В качестве масштабов приняты: ширина (при симметричном профиле скоростей полуширина) канала  $h$ , исходная концентрация примеси  $n_0$  и гидродинамический масштаб скорости  $v/h$ .

В цилиндрических координатах приведенное уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dz} \int_0^1 n u r dr = -b \int_0^1 n^m r dr.$$

Задавая профиль концентрации в виде  $n(x, y) = n_0 f(x) \varphi(y)$  и зная из решения теплофизической части задачи профиль скорости, после интегрирования получим уравнение для  $f(x)$

$$\frac{df}{dx} = -B f^m, \quad (5)$$

где

$$B = \frac{b \int_0^1 \varphi^m(y) dy}{\int_0^1 u \varphi(y) dy}. \quad (6)$$

Вид решения уравнения (5) зависит от формального порядка реакции  $m$ . При реакции первого порядка зависимость  $n(x)$  носит экспоненциальный характер:

$$n(x) = n_0 \exp(-Bx). \quad (7)$$

При втором и третьем порядке реакции решения соответственно имеют вид

$$n(x) = \frac{n_0}{1 + B_1 n_0 x}; \quad (8)$$

$$n(x) = \frac{n_0}{\sqrt{1 + 2B_2 n_0^2 x}}. \quad (9)$$

При оценке длины активной зоны реактора следует выбрать реакцию первого порядка, так как она дает наиболее медленное падение концентрации конвертируемого компонента. Длину активной зоны следует выбрать такой, чтобы концентрация подавляемой вредной примеси оказалась ниже желаемого уровня (например, ниже предельно допустимой концентрации  $n_{пр}$ ). Полагая в уравнении (7)  $n = n_{пр}$ , с учетом (6) имеем следующую оценку для длины в размерном виде:

$$L \geq \frac{\langle u \rangle \ln \frac{n_0}{n_{пр}} \int_0^1 \psi(y) \varphi(y) dy}{k \int_0^1 \varphi(y) dy}. \quad (10)$$

Здесь функция  $\psi(y)$ , нормированная на единицу, определяет профиль скорости  $u = \langle u \rangle \psi(y)$ . Полученный результат имеет довольно прозрачный физический смысл. Длина активной зоны плазмохимического реактора с большим расходом газа прямо пропорциональна расходу газа и обратно пропорциональна константе скорости химической реакции. Входящие в формулу интегралы представляют собой некоторые числа, которые нетрудно вычислить, зная эпюру скорости и концентрации. При выборе последней следует учитывать ее зависимость от профиля температуры. В частности, если концентрация примесей на входе в реактор не зависит от поперечной координаты  $y$ , то в силу постоянства  $k$  этот закон сохранится на всем протяжении активной зоны:

$$n(x, y) = n(x). \quad (11)$$

С учетом этого формула (10) принимает вид

$$L \geq \frac{\langle u \rangle \ln \frac{n_0}{n_{пр}}}{k}. \quad (12)$$

Полагая для примера  $k = 10$  1/с,  $n_0/n_{пр} = 100$ ,  $\langle u \rangle = 2$  м/с, получим  $L \geq 0,92$  м.

Следует подчеркнуть, что предлагаемый подход позволяет не только определить продольную длину разрядной зоны реактора, но и имеет важное практическое значение для выбора параметров физической модели плазмохимического реактора. Действительно, как следует из вышерассмотренного, безразмерная длина активной зоны реактора определяется следующими критериями подобия [3]:

$$\frac{L}{h} = f \left( \langle Re \rangle; \frac{kh^2}{v}; \frac{n_0}{n_{пр}}; K; A \right). \quad (13)$$

Здесь  $\langle Re \rangle$  – среднее по сечению канала реактора число Рейнольдса;  $v$  – кинематическая вязкость газа;  $k$  – константа скорости реакции первого порядка;  $K = \frac{Gr}{\langle Re \rangle}$  – конвективный

параметр;  $A = \frac{1 - \frac{j}{Pr}}{\langle Re \rangle}$  – параметр, характеризующий эффективность отвода тепла через боковые стенки реактора;  $Gr$ ,  $Pr$  – число Грассгофа и число Прандтля, соответственно.

В реакторах барьерного разряда, где скорость протока газа мала, при больших градиентах концентрации может оказаться, что продольной диффузией пренебречь уже нельзя. В этом случае уравнение для  $f$ -функции будет иметь вид

$$\frac{d^2 f}{dx^2} - \alpha \frac{df}{dx} - \beta f^m = 0, \quad (14)$$

где

$$\alpha = \frac{v \langle Re \rangle \int_0^1 \varphi(y) \psi(y) dy}{D \int_0^1 \varphi(y) dy};$$

$$\beta = \frac{kh^2 n_0^{m-1} \int_0^1 \varphi^m(y) dy}{D \int_0^1 \varphi(y) dy}. \quad (15)$$

Решение нелинейного уравнения (14) будем искать приближенным методом Галеркина. Суть метода заключается в том, что решение уравнения ищется в виде отрезка ряда, представляющего собой линейную суперпозицию некоторых базисных функций, удовлетворяющую граничным условиям. Коэффициенты разложения находятся из интегральных соотношений, выражающих ортогональность невязки к каждой базисной функции. При удачном выборе функций достаточно точный результат получается при отрезке ряда, содержащем несколько функций. Так как нас интересует оценка длины реактора, то можно ограничиться одной базисной функцией. Выбор ее очевиден. Уравнение (14) при  $m = 1$  имеет точное решение: концентрация обезвреживаемого компонента падает вдоль реактора по экспоненциальному закону. При  $m \neq 1$  закон падения концентрации будет близок к экспоненциальному, поэтому решение уравнения (14) будем искать в виде

$$f(x) = \exp(-\gamma x). \quad (16)$$

После элементарных вычислений получим

$$\gamma = -\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} + \frac{2\beta}{m+1}}. \quad (17)$$

Семенов Владимир Константинович,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры атомных электростанций,  
телефон (4932) 26-99-15,  
e-mail: npp@aes.ispu.ru

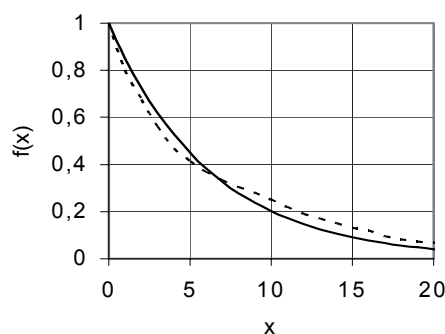
Таким образом, длина активной зоны реактора должна удовлетворять неравенству

$$L \geq \frac{h \ln \frac{n_0}{n_{np}}}{\gamma}. \quad (18)$$

Полагая для примера  $k = 10$  1/с,  $n_0/n_{np} = 100$ ,  $Re = 30$ ,  $h = 2$  мм, получим  $L \geq 15$  см. В безразмерном виде длина активной зоны реактора должна определяться следующими критериями подобия:

$$\frac{L}{h} = f \left( \langle Re \rangle; \frac{v}{D}; \frac{kh^2 n_0^{m-1}}{D}; \frac{n_0}{n_{np}}; K; A \right). \quad (19)$$

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты численного и аналитического расчета для реакции второго порядка.



Сравнение результатов численного и аналитического решения

Сравнение результатов расчета по формуле (18) с результатами численного решения уравнения (14) для конкретных данных показало, что для реакций первого порядка относительная погрешность не превосходит 0,01, тогда как для реакций второго и третьего порядка она составляет  $\approx 0,1$  и  $0,2$ , соответственно.

#### Список литературы

1. **Высоковольтные** электротехнологии / О.А. Аношин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др. – М.: МЭИ, 2000.
2. **Семенов В.К., Мешалкин Д.В.** Экспериментальное исследование плазмохимических реакторов фронтальных волн ионизации // Изв. Вузов: Ядерная энергетика. – 2000. – № 2. – С. 50–53.
3. **Семенов В.К.** К вопросу теплообмена в вертикальных каналах газоразрядных аппаратов // ТВТ. – 1998. – № 3. – Т. 36. – С. 503–507.