

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. ФАЙНЗИЛЬБЕР

**НЕКОТОРЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

(Представлено академиком Л. С. Лейбензоном 27 VIII 1949)

1. В теории процессов химической технологии весьма значительное место занимают вопросы транспортировки жидкостей и газов. Кроме того, само течение производственного процесса зависит от скорости химической реакции, являющейся функцией поля концентраций, а следовательно, и поля скоростей. В связи с этим влияние гидродинамических факторов на химические процессы и процессы химической технологии приобретает весьма существенное значение.

Основы разработки нового направления исследования процессов химической технологии, сочетающего методы химической кинетики с методами гидродинамики, даны в работах Н. М. Жаворонкова (1), которым было получено гидродинамическое решение основных проблем теории процесса в скрубберах: 1) определение режима течения, 2) определение закона сопротивлений, 3) выбор наивыгоднейшей формы обтекаемого профиля (насадки). Значение этих работ заключается не только в том, что в них впервые было дано рациональное и эффективное применение методов гидродинамики к процессам химической технологии, но также и в том, что в них теоретически и экспериментально доказана практическая применимость новой теории к часто производственным процессам.

Переходя к изложению содержания настоящей работы, отметим, прежде всего, что из вышеуказанных работ Н. М. Жаворонкова следует, что производственным условиям (например, для скрубберов) обычно соответствует турбулентный режим; в связи с этим для целей химической технологии представляется актуальным установление общих зависимостей турбулентного химического процесса, в частности, закона распределения турбулентных диффузионных напряжений как для гетерогенного, так и для гомогенного химических процессов.

Так как мы имеем дело с турбулентным процессом, то все рассматриваемые нами далее величины будут представлять собой осреднения по времени.

2. Пусть смесь газа с примесью концентрации c движется, обтекая некоторые твердые препятствия, и пусть на поверхности происходит некоторая гетерогенная химическая реакция (например, воздух с примесью аммиака обтекает поверхность, покрытую ортофосфорной кислотой H_3PO_4 , — указанная схема часто применяется для проведения опытов по аналогии между диффузией и теплопередачей (2)).

Ось x направим по твердой поверхности, ось y — перпендикулярно ей.

Выделим движущийся элемент смеси I, ограниченный снизу обтекаемой поверхностью $y = 0$, сверху линией с уравнением $y = y(x)$ и с боков вертикальными сечениями x и $x + dx$ (в поперечном направлении размер элемента равен единице).

Применим к элементу I уравнение расхода для примеси.

Через левое сечение $((x, 0); (x, y))$ вносится количество вещества

$$M_{II} = \int_0^y uc \, dy$$

(здесь u — горизонтальная компонента скорости).

Через правое сечение $((x + dx, 0); (x + dx, y))$ уносится количество вещества

$$M_{II} + dM_{II} = \int_0^y cu \, dy + \frac{d}{dx} \int_0^y cu \, dy \cdot dx.$$

Для того чтобы подсчитать количество вещества примеси, входящее через верхнее сечение $y = y(x)$, подсчитаем сначала количество всей смеси, проходящей через это сечение. Для этого, применяя к элементу уравнение расхода для всей смеси, имеем

$$M_I + \int_0^y u \, dy = \int_0^y u \, dy + \frac{d}{dx} \int_0^y u \, dy \cdot dx,$$

откуда

$$M_I = \frac{d}{dx} \int_0^y u \, dy \cdot dx,$$

и, следовательно, масса примеси, вносимая через сечение $y = y(x)$,

равна $c \frac{d}{dx} \int_0^y u \, dy \cdot dx$.

Далее, количество вещества примеси, вносимое диффузионными потоками, равно $i_0 dx - i dx$ (здесь i — диффузионный поток вещества, i_0 — его значение на стенке).

Уравнение расхода для элемента I, следовательно, запишется

$$\frac{d}{dx} \int_0^y cu \, dy - c \frac{d}{dx} \int_0^y u \, dy = i - i_0. \quad (1)$$

Применим аналогичное уравнение расхода для элемента газа II, ограниченного снизу той же линией $y = y(x)$, с боков сечениями x и $x + dx$, сверху границей пограничного слоя $y = \delta(x)$ (диффузионным пограничным слоем мы называем область, где продольные градиенты концентрации $\partial c / \partial x$ пренебрежимо малы по сравнению с поперечными градиентами $\partial c / \partial y$).

Через левое сечение $((x, y); (x, \delta))$ вносится количество вещества примеси

$$M_{III} = \int_y^\delta cu \, dy.$$

Через правое сечение $((x + dx, y); (x + dx, \delta))$ уносится количество вещества

$$M_{II} = \int_y^{\delta} cu dy + \frac{d}{dx} \int_y^{\delta} cu dy \cdot dx.$$

Масса вещества примеси, уходящая через сечение $y = y(x)$, согласно уже проведенному расчету, равна $c \frac{d}{dx} \int_0^y u dy \cdot dx$.

Чтобы подсчитать количество примеси, входящее через сечение $y = \delta(x)$, подсчитаем сначала количество всей смеси M_{II} , проходящее через это сечение. Применяя к объему элемента II уравнение расхода для всей смеси, имеем

$$M_{II} + \int_y^{\delta} u dy = \int_y^{\delta} u dy + \frac{d}{dx} \int_y^{\delta} u dy \cdot dx + \frac{d}{dx} \int_0^y u dy \cdot dx,$$

откуда

$$M_{II} = \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} u dy \cdot dx.$$

Масса примеси, вносимая через сечение $y = \delta(x)$, следовательно равна $\bar{c} \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} u dy \cdot dx$; здесь $\bar{c} = c(x, \delta)$ — значение концентрации на границе слоя.

Через сечение $y = y(x)$ уносится диффузионным потоком количество вещества, равное $i dx$.

В сечении $y = \delta(x)$, по самому определению пограничного слоя, диффузионный поток равен нулю.

Следовательно, окончательно уравнение расхода для примеси в элементе объема II записывается:

$$\frac{d}{dx} \int_y^{\delta} cu dy - \bar{c} \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} u dy + c \frac{d}{dx} \int_0^y u dy = -i. \quad (2)$$

Перейдем теперь в уравнениях (1) и (2) к независимым переменным

$$x \text{ и } t = y/\delta(x).$$

Считая, как это обычно делается, если кривизна поверхности невелика, что все элементы течения являются только функциями t и не зависят от x , сведем уравнения (1) и (2) к виду

$$\frac{d\delta}{dx} \left(\int_0^t cu dt - c \int_0^t u dt \right) = i - i_0, \quad (1')$$

$$\frac{d\delta}{dx} \left(\int_t^1 cu dt - \bar{c} \int_0^1 u dt + c \int_0^t u dt \right) = -i. \quad (2')$$

Так как на поверхности происходит химическая реакция, то i_0 — диффузионный поток на поверхности — отличен от нуля и, исключая из уравнений (1') и (2') величину $d\delta/dx$, получаем общий закон распределения диффузионных потоков при наличии гетерогенной реакции в виде

$$\frac{i}{i_0} = \frac{\int_0^1 \int_{t_0}^t u dt \cdot \frac{dc}{dt} dt}{\int_0^1 \int_0^t u dt \cdot \frac{dc}{dt} dt} \quad (3)$$

Замечательно, что закон (3) не содержит явно ни толщины слоя, ни ее производной.

Сопоставление закона (3) с законами диффузионной теории „пути смешения“ позволяет замкнуть теорию турбулентных гетерогенных реакций.

3. Весь вышеизложенный вывод непосредственно обобщается и на случай гомогенных реакций. В этом случае в уравнении (1) проявится еще дополнительный член $\int_0^y V dy$, где V — скорость объемной химической реакции.

Аналогично в уравнении (2) появится член $\int_0^{\delta} V dy$.

4. Если реакция имеет n -й порядок ($V = kc^n$), то закон (3) примет форму:

$$\frac{i - k\delta \int_0^1 c^n dt}{i_0 - k\delta \int_0^1 c^n dt} = \frac{\int_0^1 \int_{t_0}^t u dt \frac{dc}{dt} dt}{\int_0^1 \int_0^t u dt \frac{dc}{dt} dt} \quad (4)$$

Если объемная реакция не сопровождается поверхностной реакцией, т. е. если твердая поверхность не реагирует, то $i_0 = 0$ и закон (4) принимает форму

$$i = k\delta \int_0^1 c^n dt \left(\frac{\int_0^1 c^n dt}{\int_0^1 c^n dt} - \frac{\int_0^1 \int_{t_0}^t u dt \frac{dc}{dt} dt}{\int_0^1 \int_0^t u dt \frac{dc}{dt} dt} \right) \quad (5)$$

В формулах (3), (4), (5) скорость u является известной функцией t (турбулентный профиль скоростей). Для нахождения концентрации c необходимо сопоставить эти формулы с законами диффузионной теории „пути смешения“.

Таким образом могут быть определены распределение концентраций и скорость химической реакции, аналогично тому, как это было сделано в нашей работе для скоростей⁽³⁾.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность проф. Н. М. Жаворонкову, проф. С. В. Горбачеву и чл.-корр. АН СССР А. Ф. Капустинскому за их ценные замечания.

Поступило
23 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. М. Жаворонков, Хим. пром., № 2—3 (1944); №№ 9, 10 (1948); № 3 (1949). ² Сб. Исследование процессов теплопередачи, 1938. ³ А. М. Файнзильбер, ДАН, 47, № 8 (1945).