

Ф.Е. АЛТЫНБЕКОВ, Г. ОСПАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ С УЧЕТОМ МАСШТАБНОГО ПЕРЕХОДА

(Представлена академиком НАН РК О.С. Балабековым)

Разработка и эксплуатация крупномасштабных аппаратов и химических реакторов тесно связана с проблемами масштабного перехода. Развита теория масштабного перехода, основанная на представлении о гидродинамической природе масштабного эффекта, снижении эффективности аппаратов при увеличении их размеров. Масштабный переход представляется как разработка аппаратов с размерами и мощностью, превышающими размеры и мощность ранее изученных прототипов. Переход от лабораторных реакторов к опытным, от опытных к промышленным сопровождается изменением показателей химико-технологических процессов: степени превращения сырья, удельной производительности и энергозатрат и т.д. Возрастание масштабов аппаратов обычно связано с ухудшением показателей. Основная задача масштабного перехода – достижение в промышленных условиях таких показателей процессов, которые достигнуты на аппаратах меньших масштабов. Направления поиска технологических решений, обеспечивающих выполнение данной задачи, определяются результатами математического моделирования технологического процесса.

При исследовании и управлении крупнотоннажными промышленными реакторами требуется изучение и учет теории масштабного перехода, обоснование способов устранения масштабного несоответствия реальных аппаратов и лабораторных установок.

Вопрос масштабного перехода особенно остро встает при переходе на производство на крупнотоннажные реакторы. Теория подобия с помощью критериальных уравнений не дает масштабного перехода. Академик Боресков Г.К. /1/ показал, что критерии подобия массообменных и химических процессов несовместимы. Поэтому при разработке химических реакторов место теории подобия заняло математическое моделирование. Многие промышленные аппараты отрабатывают на технологических стендах, проверяя их эффективность в ходе технологического процесса. Это надежный путь, но дорогой, требует создания дорогостоящих крупномасштабных технологических стендов, что приводит к большим затратам времени и средств. Теория масштабного перехода, основанная на моделировании гидродинамических характеристик, заключается на представлении о том, что причина масштабного

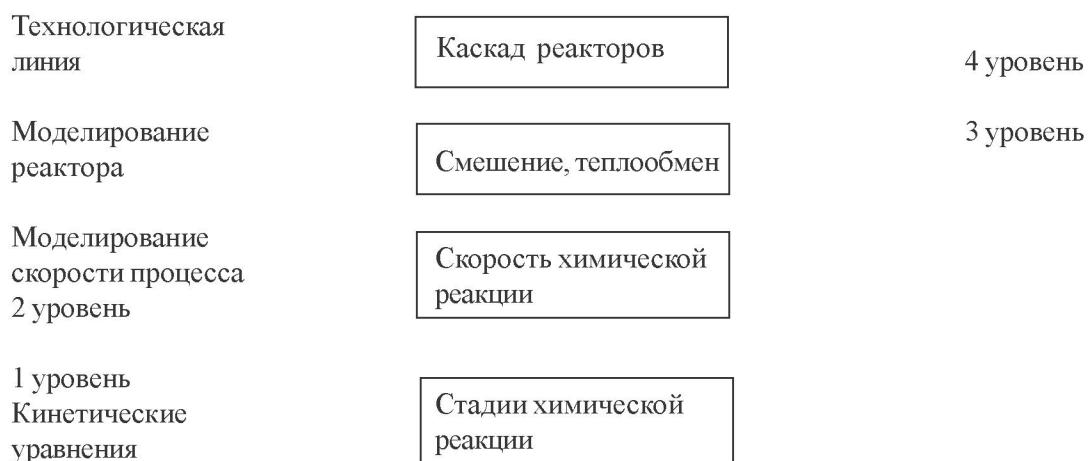


Рис. 1. Структура математической модели реактора

эффекта носит чисто гидродинамический характер, из-за неравномерности распределения потоков по сечению аппаратов, в увеличении турбулентности и обычно проявляется как усиление продольного перемешивания.

Для построения структуры математических моделей химических реакторов широкое применение нашла теория многоуровневых систем. Математическое моделирование химических реакторов /2-4/ с разбивкой его на элементарные стадии и составление многоуровневых моделей обсуждается в работах М.Г.Слинько и его сотрудников. Структура математической модели каскада промышленных реакторов будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

Первый уровень – модель кинетики. Второй уровень – модель скорости процесса, уравнения материального и теплового баланса. Третий уровень – модель в химическом реакторе.

Четвертый уровень – модель каскада реакторов. Пятый уровень – каскад реакторов в технологической линии.

Теория масштабного перехода, предложенная авторами /1-3/ и развитая в работах /4-8/, основана на представлении, что решающим фактором, обуславливающим снижение эффективности аппаратов при увеличении их размеров, является возникновение различных гидродинамических неоднородностей, – неравномерное распределение потоков по сечению. До недавнего времени считалось, что никакого масштабного эффекта не существует, и для перехода от лаб. аппаратов к промышленным достаточно описать данные лаб. экспериментов уравнениями и обеспечить их идентичность. Однако в действительности при увеличении размеров аппа-

ратов эффективность их снижается, даже при соблюдении условий подобия. Существует масштабный эффект, не описываемый теорией подобия.

Одномерное описание аппаратов, основанное на критериях подобия гидродинамики, оказывается неполным, оно не учитывает особенности двухфазного движения и структуру потоков /2/. А это неравномерности различного рода, увеличения размеров, определяющих масштаб турбулентности. Количественной характеристикой масштабного эффекта служит коэффициент масштабного перехода k . Коэффициент масштабного перехода определяет отношение возрастания единицы переноса d от лабораторного к промышленному реактору /3/.

$$k = \frac{\delta_{\text{лаб}}}{\delta_{\text{пром}}} \quad (1)$$

Необходимо получить коэффициент масштабного перехода k , близкий к единице. На самом деле коэффициент масштабного перехода k может составить 10 и более.

С ростом размеров ухудшается эффективность реакторов, выход целевых продуктов в них ниже, чем в лабораторных, в промышленных аппаратах образуются нежелательные побочные продукты, которых не было на опытной установке. В основном это касается промышленных реакторов периодического действия, на которых проблемы масштабного перехода проявляются ощутимо. Для реакторов непрерывного действия проблемы масштабного перехода не играют существенной роли.

Для учета масштабного перехода необходимо выяснить все источники масштабного эффек-

та. Источниками масштабного эффекта, наряду с пространственными неоднородностями, являются так называемые неравномерности, которые могут быть следующих типов:

1. концевые неравномерности – неоднородности распределения потоков жидкости на входе в аппарат вследствие несовершенства распределителей, подводящих жидкость;
2. неравномерности, вызванные внутренними закономерностями двухфазного течения, образованием циркулярных контуров в реакторах с барботажным и псевдоожженным слоем;
3. дефекты монтажа аппаратов;
4. дефекты конструкции.

Одной из причин возникновения пространственных неоднородностей являются струйные и отрывные течения.

Решение такого рода задач осуществляется на основе сочетания математического моделирования с правильной организацией структуры потоков на всех масштабных уровнях реакторов /1,2/.

Роль каждого из факторов зависит от типа аппарата. Например, в аппаратах с механическим перемешиванием концевые неравномерности не играют существенной роли, масштабный эффект может возникать не из-за поперечной неравномерности, а в результате увеличения размеров, определяющих масштаб турбулентности и интенсивность продольного перемешивания или размер рециркуляционных контуров.

Поэтому для решения проблемы масштабного перехода необходимо исследовать и отработать структуру потоков в промышленных аппаратах.

Поток, поступающий на вход любого аппарата, рассматривается как состоящий из отдельных элементов. Каждый элемент в силу турбулентных пульсаций, неравномерности распределения скоростей и других явлений будет характеризоваться своим собственным временем прохождения через аппарат. Это время пребывания частиц (элементов потока) является случайной величиной. Характеристики этой случайной величины должны зависеть от гидродинамических условий в аппарате. Такой характеристикой является функция распределения вероятности пребывания $F(t)$ и дифференциальная функция распределения (плотность вероятности) $f(t)$ и назы-

вается функцией распределения времени пребывания.

$$f(t) = \frac{F(t)}{dt} \quad (2)$$

Если в поток, входящий в аппарат, ввести некоторое вспомогательное вещество, трассер, то по изменению концентрации трассера на выходе из аппарата можно судить о распределении времени пребывания частиц в потоке. Это гидродинамическая характеристика потока. При изменении входной концентрации трассера в виде единичной ступеньчатой функции

$$C_{\text{вх}}(t) = 1(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Выходная концентрационная кривая совпадает с интегральной функцией распределения времени пребывания

$$C_{\text{вых}}(t) = F(t) \quad (5)$$

При изменении входной концентрации трассера в виде д-функции

$$C(t) = \delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad \int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad (6)$$

что означает мгновенный ввод в поток порции элементов трассера определенного конечного объема, выходная концентрационная кривая совпадает с дифференциальной функцией распределения времени пребывания

$$C_{\text{вых}}(t) = f(t) \quad (7)$$

Каскад промышленных реакторов с перемешивающими устройствами обычно представляют в виде ячеекной модели, в которой все ячейки полного перемешивания имеют равные рабочие объемы.

Таким образом, исследования литературных источников и научных работ ученых позволяют сделать вывод, что для использования математической модели в задачах разработки и проектирования промышленных реакторов периодического действия необходим учет масштабного перехода. В задачах проектирования и разработки крупнотоннажных промышленных реакторов непрерывного действия с перемешивающими устройствами масштабный переход не оказывает существенного влияния на характеристики процесса и учет его не обязателен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розен А. М. Масштабный переход в химической технологии, М., 1980; Вертузаев Е. Д., «Хим. пром-сть», 1982, № 8, с. 458-60.
2. Арис Р. Анализ процессов в химических реакторах. / Ю. К. Кузнецов. Л.: Химия, 1967. 328 с.
3. Слинько М.Г. Тр. Всесоюзной конференции по химическим реакторам, Новосибирск, т.1, 1975, с.7-15.
4. Слинько М.Г. Моделирование химических реакторов (Химреактор IV), часть 1, Новосибирск, 1971, с.7-21.
5. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Т. 1. М.: Логос; Высп. шк., 2003. 912 с.

6. Minsker K.S., Berlin Al.Al, Zakharov V.P., Zaikov G.E. Fast liquid-phase processes in turbulent flows. Brill Ac. Publ. VSP, Netherlands, 2004. 180 p.

7. Захаров В.П., Минскер К.С, Берлин Ал.Ал., Шевляков Ф.Б. // Теорет. основы хим. технологии. 2004. Т. 38. № 5. С. 528-531.

8. Минскер К.С., Захаров В.П., Шевляков Ф.Б., Берлин Ал.Ал.//ДАН. 2003. Т. 392. № 4. С. 490-493.

Южно-Казахстанский
государственный
университет им. М.Ауезова,
г.Шымкент

Поступила 29.01.10 г.