

УДК 66.021.3

д.т.н., доцент кафедры МАХП, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: balchug@mail.ru

Бадеников Артем Викторович,

к.т.н., ректор, Ангарский государственный технический университет, e-mail: rector@angtu.ru

МЕТОДЫ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Balchugov A.V., Badenikov A.V.

METHODS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF CHEMICAL TECHNOLOGY PROCESSES AND APPARATUSES

Аннотация. Приведен сравнительный анализ наиболее часто используемых методов исследования процессов и аппаратов химической технологии. Показано, что для гидродинамических исследований слоя орошаемой насадки наиболее плодотворным является применение методов теории подобия.

Ключевые слова: процессы и аппараты, химическая технология, методы исследования, теория подобия, дифференциальные уравнения.

Abstract. A comparative analysis of the most commonly used methods for studying processes and apparatuses in chemical technology is presented. It is shown that the methods of similarity theory are the most fruitful for hydrodynamic studies of the irrigated packing layer.

Keywords: processes and apparatuses, chemical technology, research methods, similarity theory, differential equations.

Важной целью исследования процессов и аппаратов химической технологии является получение математической зависимости, описывающей исследуемый объект. В зависимости от способа получения математической зависимости можно выделить три основных метода научного исследования [1, 2]:

1. Математическое планирование эксперимента с получением уравнения регрессии.
2. Теория подобия.
3. Математическое моделирование с использованием дифференциальных уравнений.

Представляет практический интерес выполнить сравнение данных методов и определить области их применения при исследовании процессов и аппаратов химической технологии.

Метод математического планирования позволяет получить искомую математическую зависимость на основе результатов экспериментальных исследований объекта (процесса или аппарата). Предполагается, что некоторая важная характеристика процесса (параметр оптимизации) зависит от определяющих характеристик (факторов):

$$y = f(x_1; x_2 \dots x_n), \quad (1)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – факторы; y – параметр оптимизации.

Математическая зависимость, описывающая процесс (уравнение регрессии), может иметь вид отрезка ряда Тейлора:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 \dots + b_n \cdot x_n + \dots + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots b_{(n-1)n} \cdot x_{n-1} \cdot x_n, \quad (2)$$

где b_i – постоянные коэффициенты (коэффициенты регрессии).

Например, известно, что гидравлическое сопротивление слоя орошаемой насадки в массообменной колонне $\Delta p, Pa$, (параметр оптимизации) зависит от скорости газа w , м/с, (фактор) и плотности орошения U , $m^3/(m^2 \cdot c)$, (фактор). Тогда целью планирования экспериментов с последующей математической обработкой результатов экспериментов является получение уравнения регрессии вида:

$$\Delta p = b_0 + b_1 \cdot w + b_2 \cdot U. \quad (3)$$

Математическое планирование эксперимента выполняется с целью минимизации числа экспериментов и, соответственно, затрат на проведение исследований [2]. Число экспериментов и условия их проведения должны быть достаточными, чтобы достоверно определить коэффициенты уравнения регрессии (3).

Полученное в результате обработки экспериментальных данных уравнение регрессии (3) проверяется на адекватность. Для этого рассчитанные с его помощью значения параметра оптимизации Δp сравниваются с экспериментально определенными, на основе чего делается вывод об адекватности уравнения регрессии.

Достоинством метода математического планирования эксперимента является простота взаимодействия исследователя с объектом. Исследования могут проводиться при наличии минимальной информации об объекте, поскольку ставится задача определить зависимость параметра оптимизации (Δp) от факторов (w и U). Таким образом, в методе математического планирования исследования реализуется принцип «черного ящика», предложенный кибернетиком Н. Винером [2].

Существенным недостатком метода математического планирования является ограниченность области применения полученного уравнения регрессии. Оно может применяться только в том диапазоне, в котором изменялись факторы в эксперименте, для конкретных условий (давления P и температуры T) и для конкретного объекта (например, тип и размер насадки), а также только для конкретных сред (например, воздух и вода).

В частности, данный метод может быть использован для получения уравнения регрессии с целью управления конкретным промышленным аппаратом на химическом производстве.

Более универсальным методом исследования является теория подобия [1]. В основе теории подобия лежит утверждение, что сложный физический процесс может быть описан с помощью формулы, включающей безразмерные числа (критерии) подобия [3-6]:

$$K_1 = A \cdot K_2^\gamma \cdot K_3^\psi \cdot \dots \cdot K_n^\lambda, \quad (4)$$

где A – коэффициент; K_i – число (критерий подобия); γ , ψ , λ – показатели степени. Формулу вида (4) принято называть критериальным уравнением.

Безразмерное число (критерий) подобия представляет собой меру отношения сил, действующих на объект (процесс). Например, процесс прохождения газа сквозь слой орошаемой насадки при абсорбции может

быть описан формулой, включающей критерий Эйлера Eu и критерий Рейнольдса Re :

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}, \quad (5)$$

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (6)$$

где ρ – плотность, кг/м³; d – эквивалентный диаметр насадки, м; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Критерий Эйлера Eu представляет собой меру отношения сил давления и сил инерции, а критерий Re – меру отношения сил вязкости и сил инерции.

Критериальное уравнение для гидравлического сопротивления слоя орошаемой насадки имеет вид:

$$Eu = A \cdot Re_g^\gamma \cdot Re_{жс}^\psi, \quad (7)$$

где нижние индексы соответственно: g – газ; $жс$ – жидкость.

В уравнении (7) критерий Эйлера называется определяемым критерием, а критерии Рейнольдса газа и жидкости – определяющими.

Формулы самих безразмерных критериев подобия, как (5, 6), так и других критериев, описывающих процесс, получают различными методами, например, методом анализа размерностей или с помощью дифференциальных уравнений [1].

Число и условия экспериментов должны быть достаточными, чтобы достоверно определить коэффициент A и показатели степени γ , ψ в критериальном уравнении (7). Как правило, значения A и γ , ψ определяют методом наименьших квадратов [2] с помощью специализированных компьютерных программ.

Достоинством теории подобия как метода исследования является более широкая область применения полученного критериального уравнения. Оно может использоваться для различных сред (газов и жидкостей) и физических условий (P и T), а не только для тех сред и условий, с которыми проводился эксперимент. Критериальное уравнение будет справедливым также для объекта, размеры которого значительно превышают размеры исследованного объекта. Например, критериальное уравнение, полученное для колец Рашига с эквивалентным диаметром $d=0,025$ м будет справедливым и для колец Рашига $d=0,05$ м.

Основное условие применимости критериального уравнения – диапазон значений критериев подобия (Eu и Re) процесса должен быть идентичен диапазону критериев подобия, при которых экспериментально было получено это критериальное уравнение, т.е.:

$$Eu = Eu', \quad (8)$$

$$Re = Re', \quad (9)$$

где Re и Eu – значения критериев, при которых проводился эксперимент; Re' и Eu' – значения критериев процесса, к которому предполагается применить критериальное уравнение.

Сходные по характеру процессы, для которых определяющие критерии подобия одинаковы, называются подобными процессами. Они описываются одним и тем же критериальным уравнением. Каждое критериальное уравнение описывает целый класс подобных процессов. Это позволяет провести экспериментальные исследования процесса на небольшом лабораторном аппарате, а затем полученное критериальное уравнение использовать при проектировании больших промышленных аппаратов. Таким образом, теория подобия позволяет существенно снизить затраты на проведение экспериментальных исследований.

Недостатком метода исследования, основанного на теории подобия, является то, что в ряде случаев сложно или невозможно выполнить условия (8 и 9). Чем большее число критериев описывает процесс, тем сложнее выполнить условие равенства всех критериев. Тогда экспериментальные исследования приходится выполнять на громоздких полупромышленных установках.

При исследовании некоторых простых процессов и аппаратов оказывается продуктивной разработка математических моделей с помощью дифференциальных уравнений. Данный метод позволяет в ряде случаев получить достаточно точное описание процесса (аппарата) в виде лаконичной формулы.

В соответствии с данным методом для элементарного (бесконечно малого) участка (отрезка) аппарата составляется уравнение баланса. Например, уравнение баланса (прихода и расхода) энергии, массы, импульса и др. В связи с тем, что размеры участка бесконечно малы, некоторые величины в уравнении баланса также являются бесконечно малыми (например, поток массы, энергии), а

другие величины можно принять постоянными на данном элементарном участке (например, теплоемкость среды, плотность, вязкость). Данный баланс в дифференциальной форме называют дифференциальным уравнением.

Например, для гидравлического сопротивления слоя сухой насадки дифференциальное уравнение имеет вид [3]:

$$-dp = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} dL, \quad (10)$$

где λ – коэффициент сопротивления при прохождении газа через слой сухой насадки, безразмерный; L – высота слоя насадки, м; d – эквивалентный диаметр насадки, м; w – действительная скорость газа в свободном сечении насадки, м/с; p – давление, Па; ρ – плотность газа, кг/м³. В уравнении (10) знак «минус» указывает на то, что по высоте слоя насадки давление в сечении слоя насадки снижается.

Дифференциальное уравнение (10) является математической моделью процесса. Из уравнения (10) видно, что на бесконечно малом отрезке высоты слоя насадки dL происходит бесконечно малое изменение давления газа dp , а значения λ , ρ , w , d остаются неизменными. При этом по высоте слоя насадки ρ , w изменяются.

Интегрирование дифференциального уравнения (10) позволяет определить давление газа под слоем сухой насадки, достаточное для прохождения газа через слой насадки, при известном давлении газа над слоем насадки [3].

Данный метод не применим к определению гидравлического сопротивления орошаемой насадки из-за сложности процесса. В случае орошаемой насадки необходимо применять методы теории подобия. Таким образом, недостатком моделирования с использованием дифференциальных уравнений также является ограниченная область применения. Дифференциальные уравнения можно составить и решить лишь для небольшого числа простых процессов.

Другим недостатком метода дифференциальных уравнений является необходимость введения ограничений и допущений, упрощающих картину процесса. Допущения позволяют получить более простое дифференциальное уравнение. Однако данные допущения необходимо принимать обоснованно, иначе в ряде случаев это может привести

к снижению достоверности результатов расчета. Адекватность полученной математической модели (модели в дифференциальных уравнениях) проверяется далее в ходе экспериментальных исследований.

Таким образом, при изучении процессов и аппаратов химической технологии необходимо обоснованно подходить к выбору метода исследования, что позволит обеспечить высокую достоверность полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. Л., Химия, 1968, 824 с.
2. Бальчугов А.В., Бадеников А.В. Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента. Учебное пособие. Гриф ДВ РУМЦ. Ангарск, АнгТУ, 2021, 179 с.
3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л., Химия, 1987, 576 с.
4. Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Личуёв В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Ангарск, АГТА, 2006, 754 с.
5. Архипов В.А., Коноваленко А.И. Практикум по теории подобия и анализу размерностей. Учебное пособие. Томск, ТГУ, 2016, 93 с.
6. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А. Теории подобия и размерностей. Моделирование. М., Высшая школа, 1968, 208 с.

УДК 66.021.3

д.т.н., доцент кафедры МАХП, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: balchug@mail.ru

Бадеников Артем Викторович,

к.т.н., ректор, Ангарский государственный технический университет, e-mail: rector@angtu.ru

ОБЩИЙ ВИД КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СМЕСИ В ЭКСГАУСТЕРЕ

Balchugov A.V., Badenikov A.V.

GENERAL FORM OF THE CRITERIAL EQUATION FOR THE PROCESS OF SEPARATION OF A GAS-DROPLET MIXTURE IN AN EXHAUSTER

Аннотация. Получен общий вид критериального уравнения процесса разделения газокapельной смеси в эксгаустере методом анализа размерностей. Показано, что уравнение процесса содержит четыре безразмерных критерия, три из которых являются определяющими.

Ключевые слова: эксгаустер, теория подобия, критериальное уравнение, метод анализа размерностей.

Abstract. A general form of the criterial equation for the separation process of a gas-droplet mixture in an exhauster was obtained using dimensional analysis. It was shown that the process equation contains four dimensionless criteria, three of which are decisive.

Keywords: exhauster, similarity theory, criterial equation, dimensional analysis method.

В эксгаустере происходит отделение капель жидкости от газа за счет центробежной силы [1]. Эксгаустер, как правило, представляет собой цилиндрический аппарат с установленным в нем соосно вентилятором. Газокапельный поток взаимодействует с вращающимися лопастями вентилятора, и под действием центробежной силы капли от-

брасываются к стенке аппарата. Капли жидкости оседают на стенках, образуют пленку, которая под действием силы тяжести стекает вниз по стенкам, после чего жидкость отводится из аппарата.

На основе метода анализа размерностей получим общий вид критериального уравнения для процесса отделения капель