УДК 66.067.1:372.862

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПРОВЕДЕНИЮ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ ФИЛЬТРОВАНИЯ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

DEVELOPMENT OF AN APPROACH TO CONDUCTING EDUCATIONAL LABORATORY WORK «DETERMINATION OF FILTERING CONSTANTS» USING A DIGITAL TWIN

Маннанов Тимур Ильнурович
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
t.i.mannanov@yandex.ru

Кальянов Ярослав Владимирович
магистрант кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
aroslavkalanov406@gmail.com

Дюсьметова Лилия Айдаровна
студентка кафедры нефтехимии и химической технологии,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
liliya.dyusmetova@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается создание технологии цифровых двойников для проведения лабораторной работы по определению констант фильтрования в курсе «Процессы и аппараты химической технологии». Предложен комбинированный подход, объединяющий эксперимент и цифровое моделирование на основе реальных данных. Методика позволяет сократить время выполнения работы, снизить нагрузку на лабораторное оборудование и уделить больше внимания анализу результатов. Цифровой двойник лабораторной установки обеспечивает высокую точность прогнозирования, учитывая как физические закономерности процесса, так и внешние факторы. Внедрение данной методики способствует повышению эффективности образовательного процесса.

Ключевые слова: виртуальная лабораторная работа, образование, фильтрование, химическая технология, цифровой двойник.

Mannanov Timur Ilnurovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Petrochemistry and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
t.i.mannanov@yandex.ru

Kalyanov Yaroslav Vladimirovich
Master's Student of the Department
of Petrochemistry and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
aroslavkalanov406@gmail.com

Dyusmetova Liliya Aidarovna
Student of the Department of Petrochemistry
and Chemical Technology,
Ufa State Petroleum Technological University
liliya.dyusmetova@yandex.ru

Annotation. This article discusses the creation of digital twin technology to optimize laboratory work on determining filtration constants in a processes and devices of chemical technology course. A combined approach combining experiment and digital modeling based on real data is proposed. The developed methodology allows to reduce the time of work, save equipment resources and pay more attention to the analysis of the results. The digital twin of the laboratory setup ensures high prediction accuracy, taking into account both the physical patterns of the process and external factors. The implementation of this methodology helps to increase the effectiveness of the educational process.

Keywords: chemical technology, digital twin, education, filtration, virtual laboratory work.

Технология цифровых двойников воплощает передовой подход к созданию виртуальных аналогов существующих объектов, технологических процессов и комплексных систем, обеспечивая возможность их детального исследования. Цифровые модели формируют высокоточные виртуальные копии материальных объектов, позволяя проводить многочисленные эксперименты и составлять прогнозы поведения систем в разнообразных ситуациях. Применение цифровых двойников в образовательной среде преобразует учебный процесс, давая обучающимся возможность практического взаимодействия с виртуальными моделями, что способствует углубленному освоению как теоретической базы, так и практических умений. Это превращает цифровые двойники в ключевой компонент инновационной системы обучения, существенно повышающий качество образовательного процесса [1].

Становление технологии цифровых двойников приходится на первое десятилетие XXI века, когда данное понятие было впервые введено в научный оборот. На начальном этапе подобные модели нашли применение в авиакосмической и автомобилестроительной промышленности, где использова-

лись для моделирования сложных инженерных систем, существенно совершенствуя процессы проектирования и эксплуатации. Последующее развитие привело к распространению технологии на сферы энергетики, здравоохранения и транспортной инфраструктуры, способствуя эффективному контролю технического оборудования и оптимизации производственных циклов. В итоге, цифровые двойники эволюционировали из узконаправленного промышленного инструментария в универсальное технологическое решение, успешно применяемое во множестве различных сфер, включая современное образование [2].

Подготовительным этапом при создании цифрового двойника в образовании является определение объекта моделирования, сбора внутренних и внешних характеристик. На этапе сбора данных выбирают источники информации, также определяют методы обработки и хранения, проектируют структуру цифровой модели. Далее следует этап разработки, включающий создание программной системы, воспроизводящей поведение объекта. После внедрения система должна быть подвергнута верификации, при необходимости в алгоритмы системы и базу данных вносятся корректировки [3]. Таким образом, создание цифрового двойника является трудоемким и многоэтапным процессом.

Настоящая работа посвящена разработке подхода к проведению лабораторной работы «Определение констант фильтрования», проводимой в рамках курса «Процессы и аппараты химической технологии» для студентов бакалавриата по направлениям «Химическая технология» и «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», «Биотехнология» и др. [4]. Следует отметить важность данной лабораторной работы, так как процессы фильтрования широко применяются в химико-технологических процессах нефте- и газопереработки и нефтехимии. Фильтрование применяется, например, для очистки сбрасываемых и оборотных вод, очистки растворов аминов на установках абсорбционной сероочистки, и т.д. [5–8]. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 1.

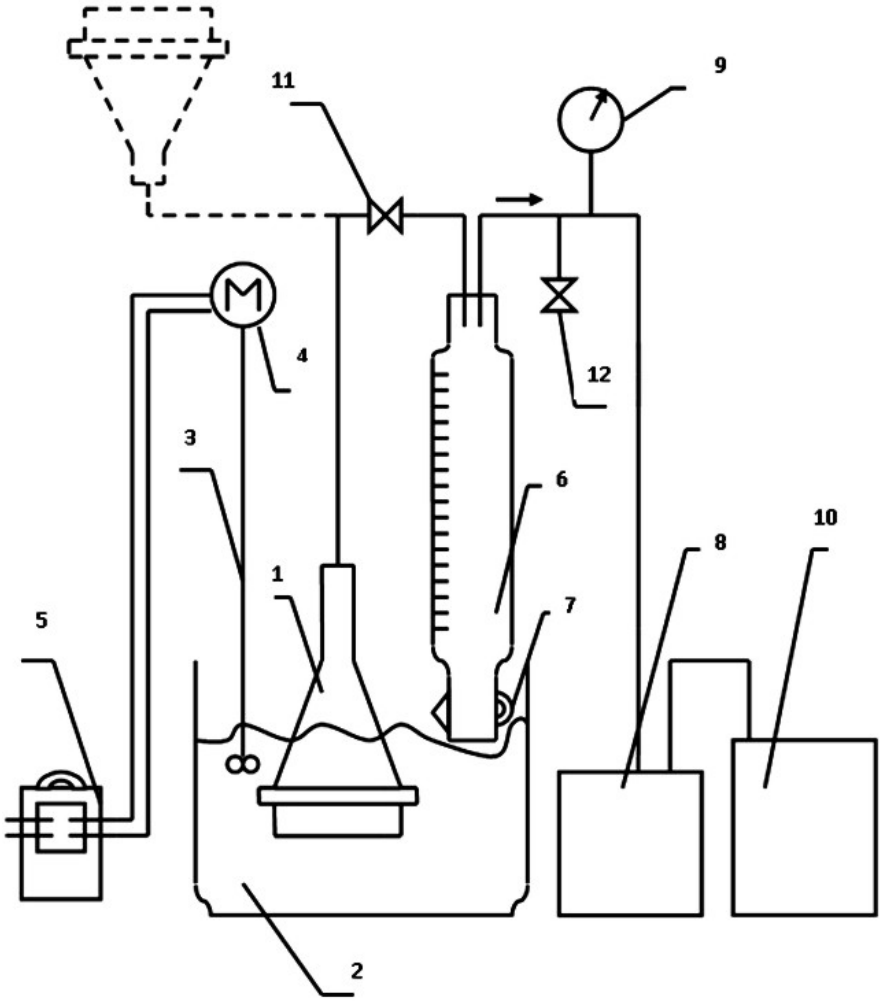

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки [4]:
1 – вакуум-фильтр; 2 – бачок для суспензии; 3 – мешалка; 4 – привод мешалки;
5 – автотрансформатор; 6 – приемник фильтрата; 7, 11, 12 – кран;
8 – промежуточная емкость; 9 – вакуумметр; 10 – вакуум-насос

Процесс фильтрования описывается основным уравнением фильтрования, имеющим вид:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{oc}+R_{ф})}, \quad (1)$$

где dV – объем фильтрата, проходящим через единицу поверхности фильтрования S за время $d\tau$; ΔP – движущая сила процесса фильтрования; μ – динамическая вязкость фильтрата; R_{oc} – сопротивление осадка; $R_ф$ – сопротивление фильтрующей перегородки [9].

Удельное сопротивление осадка вычисляется по формуле:

$$R_{oc} = r_0 x_0 \frac{V}{S}, \quad (2)$$

где r_0 – удельное сопротивление осадка; x_0 – отношение объема осадка к объему фильтрата.

При проведении процесса фильтрования при постоянной разности давления, уравнение 1 после интегрирования преобразуется к виду:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\mu \cdot r_0 \cdot x_0}{S^2 \cdot \Delta P} \cdot V + \frac{\mu \cdot R_ф}{S \cdot \Delta P} = MV + N, \quad (3)$$

где M и N – константы фильтрования.

Для сжимаемых осадков изменение удельного объемного сопротивления осадка r0 от перепада давления выражаются в виде степенной зависимости:

$$r_0 = r_0^1 (\Delta P)^m, \quad (4)$$

где m – степень сжимаемости [4].

Таким образом, для определения констант фильтрования M и N, а также степени сжимаемости осадка m студенту в рамках лабораторной работы необходимо выполнить минимум 3 раза процесс фильтрования модельной суспензии при различной движущей силе процесса. Данная лабораторная работа имеет достаточно высокую трудозатратность и время выполнения, особенно для экспериментов с малым значением движущей силы процесса. В результате большая часть времени лабораторного занятия затрачивается студентами на непосредственное выполнение фильтрования, и малая часть времени остается как для изучения методики проведения эксперимента до выполнения опыта, так и на обсуждение результатов работы с преподавателем, являющееся наиболее важным этапом занятия.

В целях снижения затрат времени на выполнение серий однотипных экспериментов, а также для экономии ресурса оборудования лабораторной установки, нами предлагается комбинированный подход к выполнению данной лабораторной работы с применением цифрового двойника лабораторной установки. База данных для создания цифрового двойника установки фильтрования сформирована исходя из результатов лабораторных работ студентов за предыдущие 5 лет. В результате статистической обработки результатов лабораторных работ формируется эмпирическая модель, учитывающая не только физические зависимости, описывающие процесс фильтрования, но и внешние возмущения, влияющие на результаты лабораторной работы. Таким образом, мы получаем наиболее полную и приближенную к реальности модель процесса фильтрования.

Разрабатываемая на основе цифрового двойника программа базируется на полученной эмпирической модели, также предусматривается возможность выбрать результаты напрямую из собранной базы данных. Кроме этого, можно будет выполнить теоретический расчет процесса фильтрования для оценки погрешности эксперимента. В результате появляется возможность существенно экономить время на выполнение эксперимента: студент выполняет натурный эксперимент однократно, для ознакомления с физикой процесса и особенностями работы фильтровальной установки, а остальные серии экспериментов проводятся с применением цифрового двойника процесса. Таким образом освобождается время для обсуждения результатов работы с преподавателем, а также появляется возможность выполнения большего количества серий экспериментов для увеличения точности получаемых результатов.

Список литературы

1. Что такое цифровой двойник и где их используют. – URL : trends.rbc.ru: сайт. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb (дата обращения 02.12.2024).

2. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 4. – С. 35–43.
3. Вихман В.В. Цифровые двойники» в образовании: перспективы и реальность / В.В. Вихман, М.В. Ромм // Высшее образование в России. – 2021. – № 2. – С. 22–32.
4. Чуракова С.К. Определение констант фильтрования : лабораторный практикум / С.К. Чуракова, С.П. Ломакин, И.Ф. Удовенко. – Уфа : Из-во УГНТУ, 2022. – 15 с.
5. Губанов Л.Н. Глубокая очистка сточных вод от нерастворимых примесей фильтрованием через пористые перегородки / Л.Н. Губанов, Д.Д. Губанов // Вестник ПТО РААСН. – 2017. – № 20. – С. 284–287.
6. Голубева И.А. Актуальные проблемы аминовой очистки природных газов, анализ и пути решения / И.А. Голубева, А.В. Дашкина, И.В. Шульга // Нефтехимия, 2020. – Т. 60. – № 1. – С. 51–56.
7. Кузнецов Л.К. Технология фильтрования в физико-химических процессах водоподготовки / Л.К. Кузнецов, А.И. Габитов // Башкирский химический журнал, 2009. – Т. 16. – № 2. – С. 84–92.
8. Вертинский А.П. Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика // Инновации и инвестиции. – 2019 – № 1. – С. 175–182.
9. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов – М. : Химия, 1971. – 784 с.

List of references:

1. What kind of digital engine and where they are used. – URL : trends.rbc.ru: website. – URL : https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb (date of application 02/12/2024).
2. Sosfenov D.A. The Digital Twin: the history of renaissance and development prospects // Intellect. Innovations. Investments. – 2023. – Vol. 4. – P. 35–43.
3. Vikhman V.V. «Digital twins» in Education: Prospects and Reality. Higher education in Russia / V.V. Vikhman, M.V. Romm. – 2021. – Vol. 2. – P. 22–32.
4. Churakova S.K. Determination of filtration constants : laboratory practice / S.K. Churakova, S.P. Lomakin, I.F. Udovenko. – Ufa : USPTU Publishing House, 2022. – 15 p.
5. Gubanov L.N. Deep wastewater treatment from harmful impurities by filtration through porous partitions / L.N. Gubanov, D.D. Gubanov // RAASN journals platform – 2017. – Vol. 20. – P. 284–287.
6. Golubeva I.A. Actual problems of amine purification of natural gas, analysis and solutions / I.A. Golubeva, A.V. Dashkina, I.V. Shulga // Petrochemistry. – 2020. – Vol. 1. – P. 51–56.
7. Kuznetsov L.K. Technology of filtering in physical and chemical processes of water-preparation / L.K. Kuznetsov, A.I. Gabitov // Bashkir Chemical Journal. – 2009. – Vol. 16. – № 2. – P. 84–92.
8. Vertinskiy A.P. Modern methods of wastewater treatment: application features and problems // Innovations and Investments. – 2019 – № 1. – P. 175–182.
9. Kasatkin A.G. Basic processes and devices of chemical technology. – M. : Chemistry, 1971. – 784 p.