

УДК 004.094

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0018

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИРТУАЛЬНОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

© 2021

Обухов Артем Дмитриевич, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Майстренко Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы
автоматизированной поддержки принятия решений», директор Института заочного обучения

Патутин Кирилл Игоревич, студент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Вехтева Надежда Андреевна, магистрант

кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»

Тамбовский государственный технологический университет

(392000, Россия, Тамбов, ул. Советская, 106,

e-mails: Obuhov.art@gmail.com, kirill-patutin@mail.ru, magician.loner@yandex.ru)

Аннотация. В статье приведен краткий обзор по исследованиям в области разработки виртуальных лабораторных стендов, которые доказали высокую актуальность в современных образовательных системах, функционирующих на основе виртуальной реальности. Данная технология позволяет качественно улучшить процесс подготовки студентов, особенно в условиях дистанционного обучения. В работе рассматривается задача математического моделирования и визуализации гидродинамических процессов в виртуальном лабораторном стенде для подготовки специалистов в нефтегазовой отрасли. Предложена упрощенная математическая модель, позволяющая корректно отобразить в виртуальном пространстве требуемые гидродинамические процессы без необходимости сложных аналитических расчетов, что позволило достигнуть высокой производительности. Модель формализована в нотации теории множеств, что в дальнейшем упрощает ее перенос в программное обеспечение и структуру баз данных. На основе математической модели реализовано и внедрено программное обеспечение для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли. Разработанный виртуальный стенд позволяет обучающимся исследовать гидродинамические процессы в виртуальной реальности с высокой степенью достоверности. Предложенные подходы к упрощению физических или химических процессов могут быть использованы для реализации широкого набора виртуальных лабораторных стендов, так как позволяют визуализировать данные процессы на различном оборудовании.

Ключевые слова: виртуальный лабораторный стенд, дистанционное образование, трехмерное моделирование, виртуальная реальность, визуализация физических процессов.

MATHEMATICAL MODELING AND VISUALIZATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A VIRTUAL LABORATORY STAND

© 2021

Obukhov Artem Dmitrievich, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of automated decision support systems

Maystrenko Natalia Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor
of the department of Automated decision support systems, director of the institute of distance learning

Patutin Kirill Igorevich, student of the department of automated decision support systems

Vekheteva Nadezhda Andreevna, master's student of the department of automated decision support systems

Tambov State Technological University

(392000, Russia, Tambov, Soviet street, 106,

e-mail: Obuhov.art@gmail.com, kirill-patutin@mail.ru, magician.loner@yandex.ru)

Abstract. The article provides a brief overview of research in the development of virtual laboratory stands, which have proven to be highly relevant in modern educational systems operating on the basis of virtual reality. This technology makes it possible to qualitatively improve the process of training students, especially in the context of distance learning. The paper considers the problem of mathematical modeling and visualization of hydrodynamic processes in a virtual laboratory bench for training specialists in the oil and gas industry. A simplified mathematical model is proposed that allows to correctly display the required hydrodynamic processes in virtual space without the need for complex analytical calculations, which made it possible to achieve high productivity. The model is formalized in set theory notation, which further simplifies its transfer to software and database structures. On the basis of a mathematical model, software for the training of specialists in the oil and gas industry has been implemented and implemented. The developed virtual stand allows students to explore hydrodynamic processes in virtual reality with a high degree of reliability. The proposed approaches to simplifying physical or chemical processes can be used to implement a wide range of virtual laboratory stands, since they allow visualizing these processes on various equipment.

Keywords: virtual laboratory bench, distance education, 3D modeling, virtual reality, visualization of physical processes.

Введение. Процесс подготовки специалистов нефтегазовой отрасли включает как теоретический курс, так и комплекс практических упражнений. Для выработки необходимого уровня сформированности практических навыков и компетенций у специалиста в этой области необходимо проведение большего количества лабораторных занятий и получение опыта работы с оборудованием. Однако из-за ограничений, вызванных различными причинами (пандемия, дистанционное обучение, отсутствие материальной возможности проведения экспериментов или их высокая опасность для обучающихся и других), организовать практические занятия в полном объеме и на достаточном уровне не всегда возможно. Одним из вариантов решения этой актуальной проблемы является использование виртуальных лабораторий и платформ, на базе которых осуществляется подготовка специалистов [1].

В предметной области нефтегазовой отрасли при проведении практических занятий необходимо изучение множества сложнейших химических и физических процессов и явлений. В ходе образовательного процесса для лучшего понимания закономерностей, протекающих в этой области, студенты знакомятся с математическими моделями данных процессов. Однако полный перенос таких моделей в область виртуального пространства зачастую не имеет смысла из-за высокой сложности математических уравнений и, следовательно, высокой стоимости и сложности программной реализации таких обучающих систем [2-4].

Поэтому в качестве основы реализации виртуальных платформ для проведения лабораторных и практических занятий используются упрощенные математические модели, обеспечивающие требуемый уровень реалистичности и соответствия реальным процессам.

В работе рассматривается задача реализации виртуальной платформы для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли. Виртуальная платформа реализуется на примере лабораторной установки исследования гидродинамических процессов [5]. В ходе исследования выявлены следующие проблемы: высокая сложность моделирования гидродинамического процесса, высокая стоимость реальных лабораторных установок, необходимость в большом объеме помещения для проведения групповых занятий. Для решения обозначенных проблем и реализации виртуальной платформы для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли необходимо: разработать упрощенную математическую модель, основанную на аппроксимации экспериментальных данных, реализовать ее в виртуальной платформе, разработать виртуальную среду платформы, апробировать платформу в образовательном процессе при подготовке специалистов нефтегазовой отрасли.

Цель исследования – осуществить формализацию процессов предметной области [6], моделирование и практическую реализацию гидродинамических процессов в виртуальной среде (в рамках данного исследования – процессы перекачивания жидкости насоса-

ми при различном способе их подключения).

Существующие подходы к моделированию гидродинамических процессов [7-8] отличаются высокой сложностью, трудоемкость их реализации в виртуальной среде не оправдана, так как упрощенная модель позволяет визуализировать эти процессы для пользователя с такой же достоверностью и реалистичностью, но большей производительностью.

Поэтому в рамках данного исследования поставлена следующая задача – разработать математическое обеспечение процессов перекачивания жидкости насосами при различном способе их подключения для виртуальной установки, путем анализа и обработки экспериментальных данных, полученных с реальной установки [9]. Упрощенная математическая модель должна использоваться в виртуальной установке для корректного расчета необходимых выходных параметров на всей области определения входных параметров с достаточной точностью и отличаться простотой реализации.

Материалы и результаты исследования. На первом этапе исследования проанализируем реальную лабораторную установку и те физические процессы, что в ней протекают.

В лабораторном стенде реализованы гидродинамические процессы перемещения жидкости по трубам через насосы, которые подключены как последовательно, так и параллельно, дополнительно подключен бак, в котором под давлением воздуха жидкость, выкаченная с помощью насосов, занимает определенный уровень. Также присутствует бак с жидкостью, откуда вода начинает циркулировать и куда она возвращается [10].

Лабораторная работа состоит в моделировании гидродинамического процесса, который описывает уравнение Навье-Стокса.

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \Delta \mathbf{v} = \frac{F - 1}{p \Delta p + \eta \Delta \eta},$$

где \mathbf{v} – скорость частицы жидкости, t – время, F – внешняя удельная (приходящаяся на единицу массы)

сила, p – давление, $\eta = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематический коэффициент вязкости (μ – динамический коэффициент вязкости), ∇ – оператор Гамильтона, Δ – оператор Лапласа. Коэффициенты вязкости зависят от температуры и для жидкости, как правило, определяются экспериментально, а для газа выводятся из кинетической теории газов [11-12].

Из-за сложности и неоправданной трудоемкости реализации в рамках виртуальной установки уравнений Навье-Стокса было принято решение собрать данные экспериментально и построить на их основе упрощенную математическую модель [13-15]. Полученные в ходе нескольких попыток данные усреднены, а закономерности между входными и выходными параметрами занесены в таблицы.

Рассмотрим формализованную математическую модель процессов виртуальной установки.

К входным параметрам данного процесса относят-

ся:

$$X = \{x, E, m\},$$

где $x = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ – положение клапанов, которые принимают значение 1 и 0, то есть, открыт или закрыт клапан. При более точном варианте стенда и его больших масштабах вентили принимают положение в процентном соотношении, то есть 0% – вентиль полностью открыт, а 100 % – он полностью закрыт;

$E = \{e_1, e_2, e_3\}$ – насосы, которые также могут принимать два значения 0 и 1. Все насосы могут работать в паре, образуя различные сочетания $\{e_1, e_2\}$, $\{e_1, e_3\}$, $\{e_2, e_3\}$, $\{e_1, e_2, e_3\}$ и по этой причине вход E принимает следующий вид: $E = \{\{e_1\}, \dots, \{e_3\}, \{e_1, e_2\}, \dots, \{e_2, e_3\}, \{e_1, e_2, e_3\}\}$.

Тогда выделим 7 подмножеств: $E = \{E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7\} = \{Ei | i = 1 \dots 7\}$;

$m = \{m_1, m_2, m_3\}$ – мощность насоса и чем она выше, тем насос лучше прокачивает жидкость по трубам. Мощность каждого насоса подразделяется на три режима: $m_1 = \{m_{11}, m_{12}, m_{13}\}$, $m_2 = \{m_{21}, m_{22}, m_{23}\}$ и $m_3 = \{m_{31}, m_{32}, m_{33}\}$.

К выходным параметрам относятся:

$$Y = \{P, R\},$$

где P – множество давлений, снимаемых датчиками с трех мест в установке в кПа

R – множество значений расхода в литрах/минуту.

Далее рассчитывается система из двух функций $S(X)$ и $S2(X)$, которые представляют функции заданные табличным способом, полученные различными методами аппроксимации (полином, кубический сплайн, нейронная сеть и так далее):

$$\begin{cases} S(X) = P, \\ S2(X) = R. \end{cases}$$

На основе функций (9) можно реализовать математическую модель лабораторной установки для её реализации в программной среде виртуальной платформы. Рассмотрим процедуру получения каждой из функций.

Функция $S(X)$ является произведением двух функций $\varphi(X)$ и $F(X)$:

$$S(X) = \varphi(X) F(E),$$

где функция $\varphi(X)$ представляет логическую функцию ошибки, то есть если какой-то из входов закрыт, а так быть не должно, то функция выдаст 0 и тогда вся функция $S(X)$ станет равна нулю и программа предупредит нас о неправильной настройке начальных условий. Сама функция $\varphi(X)$ выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi(X) &= (x_4 \oplus (x_6 \rightarrow x_5)) \wedge \\ &\wedge ((x_2 \wedge P_1 \wedge XOR(m_{11}, m_{12}, m_{13})) | \\ &|(x_1 \wedge P_2 \wedge XOR(m_{21}, m_{22}, m_{23})) | \\ &|(-x_3 \wedge P_3 \wedge XOR(m_{31}, m_{32}, m_{33}))) \end{aligned}$$

где $F(E_i) = p_{i,a,b,c}$, $p_{i,a,b,c} \in P$ – функция, которая осуществляет выбор значений давлений из таблицы экспериментальных данных. Индексы i, a, b, c определяют координаты ячейки в этой многомерной матрице давлений:

i – определяет режим работы насоса;

a – индекс таблицы P , принимающий значение от 1 до 3 в случае, если $|E_i| = 1$, иначе $a = 1$;

b – индекс таблицы P , принимающий значение от 1 до 3 в случае, если $|E_i| = 2$, иначе $b = 1$;

c – индекс таблицы P , принимающий значение от 1 до 3 в случае, если $|E_i| = 3$, иначе $c = 1$.

Значения, которые принимают индексы i, a, b, c зависят от индексов элементов множества мощностей насосов следующим образом:

если $|E_i| = 1, \exists m_{ij}$, то $j \rightarrow a$,

если $|E_i| = 2, \exists m_{ij}, m_{kl}$, то $(j, l) \rightarrow b$,

если $|E_i| = 3, \exists m_{ij}, m_{kl}, m_{nw}$, то $(j, l, w) \rightarrow c$.

Аналогично вычисляется выход R :

$$S2(X) = \varphi(X) F2(X),$$

$$F2(X) = r_{a,b,c}.$$

Разница лишь в том, что используется таблица с иной размерностью и индексами a, b, c .

Собранные экспериментальные данные и полученные на их основе зависимости в виде аппроксимирующих функций применяются в программной реализации виртуального стенда на основе 3D модели (рис. 1). Данная реализация исполнена в программной среде *Unity*. В ней имеются все необходимые функции, которые требуются для разработки приложений на основе трехмерных объектов и виртуального мира. Основными преимуществами платформы является кроссплатформенность, визуальная среда разработки, модульная система компонентов [16-18]. Это позволяет использовать разработанный проект на различных платформах (персональных компьютерах, планшетах, смартфонах), что особенно важно при организации образовательного процесса для расширения потенциальной аудитории пользователей. Реализованная в рамках виртуальной установки упрощенная математическая модель при этом не приводит к снижению производительности работы системы, что позволяет использовать ее на всех перечисленных платформах.

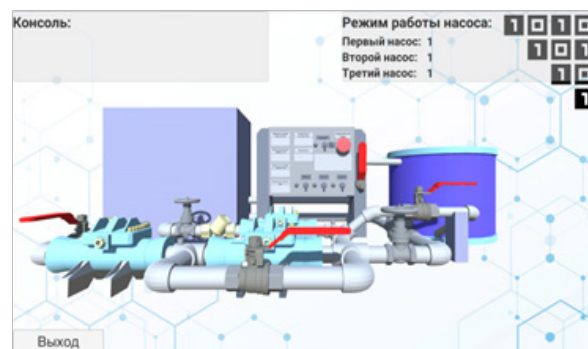


Рисунок 1 – 3D модель виртуального стенда

Трехмерные объекты были созданы в профессиональном программном обеспечении для 3D-моделирования *3ds Max* с использованием встроенных в него инструментов моделирования [19-20].

Заключение. Так как процесс пандемии негативно повлиял на образовательный процесс, у множества школ и университетов возникла потребность в проведении лабораторных работ без использования учебных стендов и очного присутствия обучающихся. В таком

случае требуется перенос этих явлений в виртуальный мир, где от пользователя требуется лишь наличие персонального компьютера. Использование виртуальных платформ также решает ряд вопросов, связанных с техникой безопасности, в ряде химических и физических экспериментов. Формат виртуальных платформ для лабораторных и практических занятий позволяет выполнять учебные задания в дистанционном формате с привлечением большого количества обучающихся. Однако создание таких виртуальных платформ сопряжено с рядом нетривиальных задач, одна из которых – математическое моделирование процессов, протекающих в лабораторных установках.

Решение данной проблемы – создание упрощенной математической модели, которая уменьшает время и сложность программной реализации виртуальной установки, снижает нагрузку на систему, позволяя программным средствам высвободить ресурсы на другие задачи. Рассмотрена реализация упрощенной математической модели, которая построена на основе аппроксимации табличных значений экспериментальных данных. Создание такой математической модели позволяет переносить различные физические или химические процессы в виртуальную среду. Разработанное на основе данной модели программное обеспечение позволило с высокой достоверностью моделировать необходимые гидродинамические процессы без серьезного влияния на производительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов, А.Ф. Модель непрерывной профессиональной подготовки кадров для нефтегазовой отрасли на основе сочетания традиционных и информационных технологий в условиях регионального вуза / А.Ф. Иванов // Международный научный журнал "Инновационная наука". - 2015. - № 6. - С. 212-213.
2. Горобец, С.Н. Использование виртуальных лабораторий при изучении химических дисциплин / С.Н. Горобец // Достижения вузовской науки. - 2014. - № 13. - С. 41-45.
3. Смолин, А.А. Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности / А.А. Смолин, Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, А.В. Меженнин, В.А. Богатырев // Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО. – 2018. - 59 с.
4. Савкина, А. В. Виртуальные лаборатории в дистанционном обучении / А. В. Савкина, С. А. Федосин // Образовательные технологии и общество. - 2014. - Т. 17. - № 4. - С. 507-517.
5. Обухов, А. Д. Разработка системы визуализации виртуальной установки для подготовки специалистов нефтегазовой отрасли / Обухов А. Д., Чеботов Н. А., Вехтева Н. А., Патутин К. И., Прокудина Н. Н. // Вестник ТГТУ. - 2020. - Т. 26. - № 4. - С. 571-580.
6. Лагоха, А.С. Формализация предметной области как базовый элемент реализации IT-проектов: учебно-методическое пособие / А.С. Лагоха // Барнаул : АлтГПУ. - 2019. - 46 с.
7. Гладков, Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Е.А. Гладков // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. - 2012. - 99 с.
8. Кудинов, В. А. Гидравлика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов // под ред. Кудинова В. А. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Издательство Юрайт. - 2019. - 386 с.
9. Земенков, Ю.Д. Эксплуатация насосно-силового оборудования на объектах трубопроводного транспорта / Ю.Д. Земенков, Ю.В. Богатенков, А.Н. Гульков, М.Ю. Земенкова, и др. // Учебное пособие под общей ред. Земенкова Ю. Д. Тюмень: ТюмГНГУ. - 2010. - 456с. - ISBN 978-5-9961-0260-0.
10. Мазо, А.Б. Гидродинамика: учебное пособие для студентов нематематических факультетов / А.Б. Мазо, К.А. Поташев // Казань: Казан. ун-т. - 2013. - 2-е изд. - 128 с.
11. Хорин, А. Н. Семейство точных решений уравнений Навье–Стокса для верификации компьютерных программ / А. Н. Хорин // Информатика и управление, Труды МФТИ., Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). - 2020. - Т. 12. - № 4. - С. 80-89.
12. Колесниченко, В.И. Введение в механику несжимаемой жидкости: учебное пособие / В.И. Колесниченко, А.Н. Шарифулин // Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. - 2019. - 127 с. - ISBN 978-5-398-02185-1.
13. Литовка, Ю.В. Получение оптимальных проектных решений и их анализ с использованием математических моделей: учебное пособие / Ю.В. Литовка // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. - 2006. - 160 с. - ISBN 5-8265-0540-0.
14. Умнов, А.Е. Методы математического моделирования: учебное пособие / А.Е. Умнов // М.: МФТИ. - 2012. - 295 с. - ISBN 5-7417-0189-2.
15. Кравцов, А.В. Системный анализ химико-технологических процессов: учебное пособие / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашкина, Е.С. Шарова // Томск: Изд-во Томского политехнического университета. - 2008. - 96 с.
16. Хоккинг, Джозеф. Unity в действии. Мультиплатформенная разработка на C# / Джозеф Хоккинг // 2-е межд. изд. – СПб.: Питер. - 2019. - 352 с.: ил. – (Серия «Для профессионалов»). - ISBN 978-5-4461-0816-9.
17. Линовес, Джонатан. Виртуальная реальность в Unity. / Джонатан Линовес // Пер. с англ. Рагимов Р. Н. – М.: ДМК Пресс. - 2016. - 316 с.: ил. ISBN 978-5-97060-234-8.
18. Ларкович, С.Н. Справочник UNITY. Кратко быстро под рукой. / С.Н. Ларкович // Справочник; Наука и техника. - 2020 г. - 288 с. - ISBN 978-5-94387-667-7.
19. Горелик, А. Г. Самоучитель 3ds Max 2018 / А. Г. Горелик // Самоучитель. СПб.: БХВ-Петербург. - 2018. - 528 с. - ISBN 978-5-9775-3941-8.
20. Гушина, О.М. Компьютерная графика и мультимедиа технологии: электронное учебно-методическое пособие / О.М. Гушина, Н.Н. Казаченок // Тольятти : Изд-во ТГУ. - 2018. - 364 с. - ISBN: 978-5-8259-1185-4.

**Работа выполнена при поддержке лаборатории
медицинских VR тренажерных систем для обуче-
ния, диагностики и реабилитации**

*Статья поступила в редакцию 12.11.2021
Статья принята к публикации 07.12.2021*