

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СТРУКТУРЫ КЕРНА

Мещеряков А.А.,

*аспирант Тюменского государственного университета, г. Тюмень, Российская Федерация
Научный руководитель – Шабиев Ф.К., доктор физ.-мат. наук, доцент*

Ключевые слова. Пористые среды, микрофлюидный чип, искусственный керн, аддитивные технологии, 3D-печать, компьютерное моделирование.

Keywords. Porous substances, microfluid chip, artificial core, additive technologies, 3D printing, computer modeling.

С развитием методов повышения нефтеотдачи возрастает потребность в более глубоко изучении процессов вытеснения нефти в пористых средах. Традиционные исследования кернов ограничены продолжительностью и невысокой воспроизводимостью. В работе предлагается подход к созданию 3D-микрофлюидных моделей пористых сред с применением аддитивных технологий.

Актуальность исследования связана с необходимостью повышения эффективности добычи нефти из трудноизвлекаемых пластов и разработки новых методов моделирования фильтрационных процессов. Традиционные исследования кернов трудоемки и мало воспроизводимы, поэтому всё большее значение приобретают микрофлюидные модели и аддитивные технологии.

Цель работы – разработка и проверка методики создания 3D-образцов пористых сред, позволяющей воспроизводить структуру порового пространства и сопоставлять расчёты с лабораторными данными.

Материалы и методы. Для реализации поставленной задачи была создана параметрическая 3D-модель искусственного керна на основе фрактальной структуры в системе КОМПАС-3D. Модель имела цилиндрическую форму диаметром 30 мм и высотой 30 мм. Внутренняя организация включала последовательные слои, повернутые на фиксированный угол относительно оси цилиндра. Это позволило изменять проницаемость путем регулирования угла поворота и геометрии слоев [1].

Образцы изготавливались методом SLA-печати на фотополимерном принтере Anycubic Photon Mono M7 Max. Толщина одного слоя составляла 0,05 мм, что обеспечивало высокую детализацию воспроизведения геометрии. В качестве материала применялась прозрачная смола High Clear Resin. После печати образцы проходили постобработку, включавшую продувку сжатым воздухом и дополнительную засветку ультрафиолетом.

Численное моделирование осуществлялось в комплексе KompasFlow на основе уравнений Навье–Стокса. Для оценки проницаемости применялся закон Дарси, связывающий расход жидкости с перепадом давления, вязкостью и геометрией модели. В качестве рабочей среды использовался гелий. Для проверки расчетов проводились лабораторные испытания открытой пористости и газопроницаемости на установке AP-608 при давлениях до 3,45 МПа.

Результаты и их обсуждение. Сравнение значений проницаемости, полученных численным моделированием и экспериментально с использованием пермеаметра-порозиметра, показало расхождение менее 5%. Это подтверждает надежность полученных данных и обоснованность применения метода для воспроизведения микрофлюидных структур.

Незначительные различия в показателях проницаемости между четырьмя образцами свидетельствуют о высокой точности SLA-печати при изготовлении кернов.

В рамках исследования оценивалась применимость 3D-печатных кернов из смолы Anycubic High Clear Resin для проведения фильтрационных и термобарических экспериментов. Тесты показали, что температура стеклования (T_g) материала составляет $\sim 75^\circ\text{C}$, а температура деформации при нагрузке 0,45 МПа (HDT) — $\sim 55^\circ\text{C}$ [2]. Поэтому рекомендуется использовать образцы при температурах не выше 50°C и давлениях до 5 МПа.

При таких условиях изменение объема поровой структуры не превышает 2%, что соответствует допустимым значениям для моделирования стандартных фильтрационных процессов.

Выбор размеров 30×30 мм был обусловлен технологическими и экспериментальными факторами. Объем около 3 см³ обеспечивает оптимальное сочетание между отражением геологической неоднородности и экономической целесообразностью, что подтверждается исследованиями. Диаметр 30 мм позволяет адекватно воспроизводить поровую гетерогенность породы и совместим с большинством лабораторных установок, что упрощает закрепление образцов [3].

Чтобы исключить влияние краевых эффектов ($L/D \geq 2$) [4], были напечатаны образцы длиной 60 мм и 90 мм при диаметре 30 мм. Полученные результаты показали различия в абсолютной проницаемости менее 3%, что говорит об отсутствии значимого влияния концевых зон на однофазную фильтрацию газа. Таким образом, размер 30×30 мм является технологически удобным, экономичным и дает достоверные результаты.

При выборе методов оценки петрофизических свойств следует учитывать особенности фотополимера. Например, метод материального баланса, не зависящий от электрофизических параметров, оптимален для 3D-печатных образцов, так как основан на измерении вытесненного объема или массы жидкости. Для повышения точности важно исключить утечки, что достигается за счет непроницаемой боковой стенки толщиной 10 мм. Метод удельного электрического сопротивления (УЭС) также может быть применен, но требует модификации состава смолы для повышения ее электропроводности. Для этого возможна добавка графена, углеродных нанотрубок или проводящих полимеров (полипиррол, полианилин). Также могут использоваться растворимые ионные маркеры – хлориды и сульфаты металлов [5].

Методы гамма- и рентгеновского просвечивания применимы для визуализации распределения насыщенности при корректной калибровке оборудования под конкретные свойства образца и насыщающей жидкости. Плотность фотополимера, сопоставимая с осадочными породами, делает такие методы применимыми.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) также подходит, так как фотополимер не содержит ферромагнитных примесей и не создает значимого фонового сигнала.

Таким образом, 3D-печатные образцы обладают необходимыми характеристиками для применения большинства методов контроля насыщенности при условии правильной подготовки и настройки экспериментальной схемы.

Настоящее исследование было сосредоточено на воспроизведении геометрии порового пространства и анализе фильтрационно-емкостных свойств искусственных образцов. Вопросы смачиваемости в данной работе не рассматривались, однако они представляют перспективное направление для будущих исследований. В дальнейшем планируется провести сравнительный анализ различных фотополимеров по их смачиваемости, а также оценить влияние модификации состава смолы и методов постобработки (плазменная активация, силикатные покрытия) на формирование требуемых смачивающих свойств.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило эффективность использования аддитивных технологий для создания искусственных кернов с контролируемыми фильтрационно-емкостными характеристиками. Разработанная методика обеспечивает точное воспроизведение геометрии порового пространства и позволяет сопоставлять численные расчеты с лабораторными измерениями. Результаты показали, что SLA-печать дает возможность получать образцы с высокой воспроизводимостью, подходящие для широкого спектра исследований, включая двухфазную фильтрацию и изучение процессов при пластовых условиях.

В дальнейшем развитие методики видится в изучении смачиваемости различных фотополимеров, модификации состава смол и создании базы данных искусственных кернов с разными параметрами. Это позволит расширить область применения технологии и повысить точность моделирования процессов в нефтегазовой гидродинамике.

1. Мещеряков, А. А. Технология производства пористых структур аддитивным способом / А. А. Мещеряков // XI Школа-семинар молодых учёных по теплофизике и механике многофазных систем «Трансформация нефтегазового комплекса 2030» : тезисы докладов, Тюмень, 22–25 мая 2024 г. / отв. ред. Б. В. Григорьев ; сост. А. П. Садыкова ; Министерство науки и высшего образования, Тюменский государственный университет, Школа естественных наук. – Тюмень, 2024.
2. Anycubic High Clear Resin. Safety Data Sheet. Revision 1.0. Issue date: 12/01/2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0245/5519/2380/files/EN_SDS_High_Clear_Resin__SDS_SGS_GHS_ANNEXII_CLP_2023112_SGS-SHENZHEN-21_Shenzhen_Ancubic_Technology_Co_Ltd_fcbe4fff-621a-4392-bd0e-e427fef5c9cf.pdf?v=1685501027. – Дата доступа: 27.01.2025.
3. Петрофизические методы исследования кернового материала : учеб. пособие : в 2 кн. / Иванов М. К., Калмыков Г. А., Белохин В. С. [и др.]. – Кн. 2 : Лабораторные методы петрофизических исследований кернового материала. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 113 с.
4. Akintola, S. A. The use of length/diameter ratio to determine the reliability of permeability data from core samples / S. A. Akintola, A. B. Orij, Z. Bala // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2014. – Vol. 3, № 6. – P. 186–194.
5. Влияние методов формирования полимерных композитных материалов с углеродными нанотрубками на механизмы электропроводности / Комаров Ф. Ф., Парфимович И. Д., Ткачев А. Г. [и др.] // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 3. – С. 475–483. – DOI: 10.21883/JTF.2021.03.50526.222-20.

АЛГОРИТМ ЗАЩИТЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА МАССОВОЙ ДОЛИ ПРОТЕИНА

Огурцов В.Ю., Фёдоров В.И.,

студенты 2 курса ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь

Научные руководители – Бувеч А.Э., канд. техн. наук, доцент,

Бувеч Т.В., канд. техн. наук, доцент

Ключевые слова. Автоматизированные программы, несанкционированный доступ, риски, шифрование данных, управление доступом, алгоритм защиты, информационная безопасность.

Keywords. Automated programs, unauthorized access, risks, data encryption, access control, protection algorithm, information security.

Определение содержания массовой доли сырого протеина является критически важным этапом в анализе пищевых продуктов, кормов и биологических материалов. Точность и достоверность результатов напрямую влияют на безопасность продукции, её соответствие нормативным требованиям и репутацию производителей. Однако автоматизированные программы, реализующие такие анализы, часто подвержены угрозам информационной безопасности, таким как несанкционированный доступ, копирование кода и восстановление данных. Эти риски угрожают не только коммерческой конфиденциальности, но и метрологической точности, что особенно критично в пищевой и фармацевтической промышленности.

Цель работы заключается в создании защищённого программного алгоритма для автоматизированного определения содержания массовой доли сырого протеина, минимизирующего риски взлома, копирования и искажения результатов.

Материалы и методы. В работе представлен комплексный подход к защите программного обеспечения для автоматизированного определения содержания массовой доли сырого протеина, включающий шифрование данных, обфускацию кода, управление доступом и проверку целостности.

Результаты и их обсуждение. Основными угрозами информационной безопасности являются несанкционированный доступ, копирование кода, восстановление данных. Разработка алгоритма защиты программы становится необходимостью, чтобы обеспечить целостность данных, конфиденциальность, авторизацию.

Реализованы основные принципы защиты программного обеспечения.

Принцип криптографии AES (Advanced Encryption Standard): симметричное блочное шифрование, использующее 128-битные ключи для защиты данных. Преимущества: высокая скорость шифрования, конфиденциальность данных, совместимость с Python. Входные параметры (масса образца, объем титранта, концентрация) и результаты анали-