

УДК 778.64

КРАТКИЙ ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ГИДРОГЕЛЯМИ НА ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Стрельцова К.А., студент гр. ХББО-02-23, III курс, Стрельникова В.О., ст. преподаватель, Голованов И.Ю., к.т.н., доцент

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва

Гидрогели – это материалы, способные удерживать значительное количество воды, что делает их перспективными для поддержания жизнедеятельности клеток в искусственной среде.

Трёхмерная печать с применением гидрогелей является перспективным методом создания биологических структур, включающих живые клетки и поддерживающие матрицы.

Одним из ключевых достоинств гидрогелей является их биологическая совместимость, что способствует поддержанию клеточной активности после печати. Эти материалы обеспечивают необходимые условия для клеток, позволяя им взаимодействовать с окружающей средой и поддерживать нормальное функционирование. Гидрогели позволяют формировать сложные структуры с уникальной архитектурой. В отличие от традиционных методов, трёхмерная печать позволяет не только создавать пористые структуры, но и учитывать требования к их механическим и биологическим характеристикам. Это даёт возможность проектировать сложные многослойные объекты.

Одним из недостатков гидрогелей является их ограниченная прочность. Несмотря на их отличную биологическую совместимость, гидрогели часто не способны выдерживать значительные механические нагрузки. Это ограничивает их применение в тех структурах, которые требуют высокой жёсткости и прочности.

Несмотря на то, что в первую очередь использование гидрогелей и биопечати актуально для развития биотехнологии и медицины [1-3], данное направления также представляет интерес для химической и смежных отраслей промышленности.

В первую очередь, за счёт возможности впитывания и удержания большого количества воды, данное направление перспективно для создания оборудования очистки сточных вод. Объект из гидрогеля помещается в загрязнённую

среду, которую в течение некоторого времени поглощает. Далее производится сушка гидрогеля от впитанной среды. При этом, гидрогель освобождается от очищенной среды, а различные загрязнения остаются в высушенном объекте из гидрогеля [4, 5]. Данный метод может быть использован и с твёрдыми рабочими средами, а также может применяться в качестве сопровождения процессов в промышленном оборудовании, например, в пищевой отрасли и холодильных установках [6].

Трёхмерная печать может быть скомбинирована с биореакторами, используемыми как в биотехнологии, так и в химической технологии. Основной целью процесса культивирования микробных клеток выступает наращивание значительного количества биомассы, представляющей собой конечный продукт, содержащий жизнеспособные микроорганизмы. При этом, если рассматривать совокупность протекающих в системе явлений, биореактор следует рассматривать как аппарат, в котором ключевую роль играют процессы теплопереноса и массопереноса. Следовательно, эффективность выращивания клеточных культур напрямую определяется уровнем интенсивности указанных процессов, что подтверждается рядом специализированных исследований [7, 8].

Вопрос оптимизации конструктивного и технологического оформления установок для культивирования с целью снижения энергозатрат, необходимых для получения заданного объема биомассы, остается одним из приоритетных направлений развития промышленности. Повышение энергетической эффективности возможно за счет усиления процессов тепло- и массообмена внутри биореактора, что, в свою очередь, достигается посредством модернизации и совершенствования его функциональных узлов и систем жизнеобеспечения [9].

Важно подчеркнуть, что для поддержания непрерывного процесса выращивания клеток и сохранения их в физиологически активном состоянии ключевым условием является обеспечение стерильности рабочей среды. Для реализации этого требования применяются различные методы микробиологического контроля. В частности, тест-системы компании ООО «Биоконтроль ГР» представляют собой пластиковые носители с нанесённой питательной средой, предназначенной для роста микроорганизмов с последующим количественным учётом образующихся колоний [10]. Использование подобных решений позволяет организовать внутренний контроль и оценить уровень микробиологической безопасности промышленных объектов, что, в свою очередь, оказывает влияние на эффективность процесса культивирования.

В ходе исследования трёхмерной печати гидрогелями, были напечатаны различные объекты из водного раствора агар-агар с массовой концентрацией 10% при температуре печати равной 60°C. Процесс послойной печати таким гидрогелем представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Трёхмерная печать объекта гидрогелем

В процессе печати было необходимо поддерживать температуру гидрогеля постоянной для сохранения его физико-механических свойств. При этом, в ходе исследования печати, было установлено, что температура печати и концентрация агар-агара в гидрогеле взаимосвязаны. Чем выше концентрация агар-агара, тем большую температуру нужно поддерживать при печати.

Напечатанные изделия массой 200 г оставляли на 30 суток в помещении со средней влажностью воздуха 40% и средней температурой 20°C. По истечению срока сушки, проводился визуальный осмотр и взвешивание образцов изделий. Часть образцов расслаивалась. Пример расслоенного высушенного образца представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Высушенный расслоенный образец напечатанного изделия из гидрогеля

Масса представленного высушенного образца составила 7 г. Образец стал твёрдым, расслоился на две части и значительно уменьшился в объёме. Далее образец был погружён в воду объёмом 100 мл с температурой 20°C (рисунок 3).



Рисунок 3 – Высушенный расслоенный образец, погружённый в воду

В течение суток образец впитал часть воды и увеличился в объёме. Изменилась не только форма образца, но и его твёрдость. (рисунок 4).



Рисунок 4 – Расслоенный образец спустя 24 часа после погружения в воду

Масса образца спустя сутки после погружения в воду изменилась с 8 г до 27 г.

Таким образом, совокупность результатов проведённых натурных экспериментов и обзор литературных источников показывают возможность многократного использования объектов из гидрогеля для очистки загрязнённых жидких сред, а также возможность трёхмерной печати гидрогелем. Результаты работы показывают основные направления для дальнейших исследований:

1. Установить рациональную температуру и концентрацию агар-агара (или другого наполнителя, например, агарозы или крахмала) не только для выхода на рациональные режимы трёхмерной печати, но и для возможности дальнейшего поддержания активного роста клеток в объекте.
2. Определить степень диффузии различных загрязняющих веществ в жидких средах в гидрогель (с учётом установленной рациональной концентрации наполнителя).
3. Обосновать необходимость применения трёхмерной печати сложных форм фильтров и других элементов оборудования химической, биотехнологической и смежных отраслей промышленности из гидрогелей.

Список литературы:

1. Макропористые биodeградируемые матриксы на основе хитозана и гиалуроновой кислоты для тканевой инженерии / М.Г. Дроздова, М.А. Водякова, Т.С. Демина [и др.] // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2016. – № 3-1. – С. 33-35.
2. Оценка возможности получения гидрогелей, из провизорных органов человека с целью их использования в 3D-биопечати / М.В. Титова, В.Е. Чернов, О.В. Протасов // Известия Российской военно-медицинской академии. – 2020. – Т. 39, № S3-5. – С. 201-204.
3. Оценка васкулогенного потенциала гидрогелей на основе модифицированного фибрина / А.И. Шпичка, А.В. Королева, А. Дайвик [и др.] // Цитология. – 2016. – Т. 58, № 10. – С. 785-791.
4. Пористые полимерные нанокомпозиционные материалы для охраны окружающей среды / Г.С. Минаков, С.А. Широких, Д.Ю. Корнилов, М.Ю. Королева // Химия в интересах устойчивого развития. – 2022. – Т. 30, № 1. – С. 56-67.
5. Исследование абсорбционных свойств гидрогелей в растворах электролитов / Л.Р. Кашапова, Д.С. Мухиддинов, С.Т. Рашидова // Научные исследования: от теории к практике. – 2016. – № 4-1(10). – С. 19-21.
6. Dynamics of Water Ice Formation during the Operation of Vessel Cryoconcentrators / М.А. Ugolnikova, V.V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57, No. 7-8. – P. 561-566.
7. Моделирование роста популяции клеток, инкубируемых в объеме гидрогеля с искусственной сетью микроканалов для подачи кислорода / Н.В. Шумова, А.В. Вязьмин, Е.К. Королев // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 2. – С. 61-65.
8. Исследование процесса гелеобразования, адгезии слоев и интенсификации массообмена с помощью микроканалов в объеме гелей / Н.В. Шумова, Е.Д. Волкова // Бутлеровские сообщения. – 2022. – Т. 71, № 9. – С. 47-56.
9. Анализ перспективных направлений в конструировании биореакторов для объемного культивирования клеток / Н.В. Шумова, Е.К. Королев, А.В. Вязьмин [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 3(52). – С. 11-19.
10. Биоконтроль. Тест-пластина Грибы, дрожжи, плесени – Режим доступа: <https://clck.ru/3SaptQ> (дата обращения: 17.03.2026).