

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В РАСТВОРАХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ

Власова И. П.¹, Урсу М.Ю.¹, Гудзеров Л. И.¹, Смирнова Ю.Ю.¹
Научный руководитель – канд. хим. наук, доцент Уласевич С.А.¹

¹Университет ИТМО
ipvlasova@itmo.ru

Введение

Кавитационные пузыри, содержащие в своей оболочке полиэлектролиты или белки могут использоваться для контрастирования картинки, получаемой при помощи ультразвука [1]. Модификация оболочки кавитационного пузыря может придать ему дополнительные свойства [2] такие как различную устойчивость, а также возможность доставки лекарственных молекул в зависимости от изменения внешних условий среды (температура, механическое воздействие и т. п.). Лекарственное вещество может высвободиться при коллапсе кавитационных пузырей, при этом оболочка пузыря впоследствии резорбируется. Однако, разработка эффективных систем направленной доставки лекарственных средств и контрастных агентов для ультразвуковой диагностики требует понимания особенностей кавитации в растворах полиэлектролитов, так как полиэлектролиты могут использоваться как одна из компонентов оболочки необходимого действующего вещества.

В связи с этим целью данной работы было выявление закономерности между особенностями взаимодействия полиэлектролитов, эффективности кавитации и устойчивости полученных пузырей с помощью методов машинного обучения [3].

Основная часть

Изучение кавитационной активности проводилось с помощью обработки растворов полиэлектролитов ультразвуком УЗГ 55-22 и параллельной съемке высокоскоростной камерой Phantom Miro C110, а также использованием кавитометра ИКА-4Д для получения данных о времени жизни пузыря, интенсивности кавитации, изменении температуры и энергии системы. Для сегментации кавитационных пузырьков на видеокдрах была применена модель YOLOv8, обученная на предварительно размеченном в Roboflow датасете. Архитектура с высоким разрешением масок обеспечивает точное выделение областей интереса. Последующая привязка обнаруженных объектов к уникальным трекам реализована с помощью модифицированного алгоритма ByteTrack, использующего фильтр Калмана для предсказания позиции объекта и комбинированный критерий (IoU и евклидово расстояние между центроидами) для сопоставления детекций. Это позволяет надежно отслеживать траектории пузырьков даже при их частичной окклюзии или временном пропадании из кадра. С помощью данной модели получались данные о среднем времени жизни, скорости пузыря в зависимости от типа и концентрации полиэлектролита. Исследовались растворы полистиролсульфоната и полиэтиленimina в концентрациях 2, 4, 6 и 8 мг/мл. В качестве контрольного образца использовалась деионизованная вода.

С ростом концентрации увеличивалось среднее время жизни кавитационного пузыря, но самое большое время (2,75 с) жизни кавитационного пузырька было получено в деионизованной воде без добавок.

В растворах полиэтиленimina самые большие по радиусу (451 мкм) и самые быстрые (406,38 мкм/с) кавитационные пузыри получались в растворах 6 мг/мл. В

растворах полистиролсульфоната самые большие (405 мкм) и быстрые (421,46 мкм/с) пузыри образовывались в растворе с концентрацией 4 мг/мл.

Измерение акустического сигнала с помощью кавитометра позволяет судить о кавитационной активности раствора [4]. Выявлено, что в воде среднее значение составляет $14,6 \pm 7,8$ мВ, а в растворе, содержащем полистиролсульфонат в концентрации 8 мг/мл, - $43,0 \pm 18,7$ мВ, при этом в растворе полиэтиленimina той же концентрации величина кавитационной активности составляет $34,3 \pm 13,8$ мВ. На основании этого можно предположить, что кавитационная активность раствора растет с повышением концентрации в растворах, содержащих полистиролсульфонат и полиэтиленimin.

Выводы

Установлено, что тип и концентрация полиэлектролита существенно влияют на кавитационную активность растворов. С увеличением концентрации полистиролсульфоната и полиэтиленimina возрастает среднее время жизни кавитационных пузырей и амплитуда акустического сигнала, что свидетельствует об усилении кавитационной активности раствора. Полученные результаты будут полезны в дальнейших исследованиях по получению композитных материалов с помощью ультразвука для биомедицинских применений.

Литература

1. Estifeeva T. M. et al. Direct insights into synthesis, protein integrity, and blood microrheology of albumin microbubbles //Acta Biomaterialia. – 2025.
2. Shchukin D. G., Gorin D. A., Möhwald H. Ultrasonically induced opening of polyelectrolyte microcontainers //Langmuir. – 2006. – Т. 22. – №. 17. – С. 7400-7404.
3. Korolev I. et al. When bubbles are not spherical: artificial intelligence analysis of ultrasonic cavitation bubbles in solutions of varying concentrations //The Journal of Physical Chemistry B. – 2022. – Т. 126. – №. 16. – С. 3161-3169.
4. Tzanakis I. et al. Calibration and performance assessment of an innovative high-temperature cavitometer //Sensors and Actuators A: Physical. – 2016. – Т. 240. – С. 57-69.