

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОНТРАСТНЫХ АГЕНТОВ С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБОЛОЧКИ

А. В. ТЕТЕРЕВ, Н. А. ТЕТЕРЕВ, Л. В. РУДАК, Н. И. МИСЮЧЕНКО (Минск, Беларусь)

Ультразвуковые контрастные агенты (УКА) представляют собой искусственно созданные пузырьки микронного размера, заключенные в биологическую оболочку. Широкое использование УКА в медицинской практике, особенно в области эхокардиографии, и совершенствование технологий их изготовления привели к интенсивным экспериментальным, теоретическим и численным исследованиям в этой области. Однако пока остаются мало изученными реологические свойства оболочек УКА, оказывающие существенное влияние на их динамику.

Для моделирования радиальных осцилляций УКА с учетом его трансляционного движения и реологических свойств оболочки и окружающей жидкости использовалась либо система уравнений Рэлей-Плессетского типа, предложенная в [1], либо гидродинамическое приближение с учетом реологических свойств сред [2]. Система уравнений Рэлей-Плессетского типа может быть представлена в виде

$$\begin{aligned}\dot{v} &= F(R, \delta R, v, v_x, D_i, \dot{D}_i, X_n, Y_n, t), \quad v = \dot{R}, \\ \dot{v}_x &= F_x(R, \delta R, \dot{v}, v, X_n, Y_n, t), \quad v_x = \dot{x}, \\ \dot{D}_i &= F_i(D, R, \dot{v}, v, X_n),\end{aligned}$$

где ν – радиальная скорость поверхности пузырька, точка над переменной означает производную по времени, R – радиус пузырька, δR – толщина оболочки, ν_x – скорость смещения УКА, X_n – набор параметров, описывающих свойства газа в пузырьке и окружающей его жидкости, Y_n – набор параметров, описывающих ультразвуковое поле, ν_x – скорость смещения УКА, D_i – функция, определяющая реологическое поведение i – ой среды, x – трансляционное смещение УКА.

При решении задачи в гидродинамическом приближении все среды считаются сжимаемыми, а уравнения непрерывности, движения и энергии записываются в лагранжевых координатах для сферически симметричного случая с учетом девиатора тензора напряжений. В качестве основных реологических моделей, на основании которых находится девиатор тензора напряжений, используются модели Максвелла, Фойхта, Олдройда и упруго-пластическое приближение.

Исследование влияния реологических свойств оболочек, толщина которых составляла 0.1 мкм, на поведение УКА радиусом 1.1 мкм проводилось на протяжении трех периодов ультразвукового сигнала с частотой 2 МГц и амплитудой 200 кПа. Для значений параметров моделей, с которыми проводились расчеты, наибольшее значение смещения достигается для оболочки, подчиняющейся реологии жидкого тела Максвелла. Однако, изменив значение параметров в моделях, можно получить и иные соотношения в трансляционных смещениях. Этот факт говорит о том, что для получения адекватных результатов особенно важным является правильное построение модели и определение ее параметров на основании экспериментальных исследований.

Исследование зависимости трансляционного смещения от начального радиуса УКА проводилось при толщине оболочки равной 2 нм, поведение которой описывалось трехпараметрической моделью Олдройда. Расчеты были проведены для частот 1.5, 2.0, 2.5,

3.0 и 4.0 МГц. Для каждой из этих частот выполнялась отдельная серия расчетов, в которой начальный радиус УКА изменялся в диапазоне $0.5 \div 3.5$ мкм. Длительность ультразвукового сигнала составляла 20 периодов, а амплитуда равнялась 200 кПа. Одновременно с трансляционным смещением рассчитывалась функция мощности осцилляций, определяемая выражением

$$W(f, R_0) = 1/T \int_0^T (R(t)/R_0 - 1)^2 dt,$$

где T – это длительность сигнала, в течение которого проводится наблюдение, а R_0 – начальный радиус УКА. Сопоставление начальных радиусов УКА, при которых наблюдается максимум его смещения для данной частоты, со значениями резонансных радиусов, определяемых функцией мощности осцилляций и выражением для резонансной частоты свободных пузырьков, показывает, что трансляционное смещение так же может являться мерой, определяющей частоту УКА.

В последнее время особый интерес проявляется к УКА со сверхтонкими липидными оболочками, которые представляют собой мономолекулярный слой. Возможность существования нескольких типов агрегатного состояния таких пленок на границе раздела вода-воздух сильно осложняет описание их свойств. При сильном разрежении они ведут себя как идеальный двумерный газ, переходящий при сжатии к свойствам растянутой жидкой пленки. Еще большее их сжатие приводит к состоянию конденсированной жидкой пленки и, наконец, переходит к практически несжимаемому твердому состоянию. Дальнейшее сжатие вызывает коробление пленки, приводящее к ее разрушению. В сферически симметричном случае разрежение оболочки происходит при расширении УКА, причем оболочка при этом утончается, а сжатие происходит при уменьшении радиуса и при этом толщина оболочки увеличивается. Тогда условия разрежения и сжатия можно напрямую связать с толщиной оболочки, предположив, например, что скорость изменения девиатора напряжения выражается через соответствующие величины для моделей Максвелла и Фойхта следующим образом

$$\dot{S} = a\dot{S}_V + (1 - a)\dot{S}_M, \quad a = (h - h_1) / (h_2 - h_1), \quad h_1 \leq h \leq h_2,$$

где α определяет плавный переход от расчета жидкого тела Максвелла к твердому телу Фойхта и обратно, а последнее условие на толщину оболочки h определяет границы области перехода. В области $h < h_1$ поведение оболочки определяется моделью Максвелла, а при $h > h_2$ соответствует модели Фойхта. При превышении некоторой критической толщины происходит разрушение оболочки с обнулением возникших ранее напряжений. Отметим, что расчет УКА по предложенной реологической модели приводит к уменьшению средней толщины оболочки по сравнению с моделями Максвелла и Фойхта.

Описанная модель позволяет рассчитывать трансляционное смещение УКА и определять их резонансную частоту. В гидродинамическом приближении можно рассматривать контрастный агент с многослойной оболочкой. Предложенная модель является удобным и гибким инструментом для численного моделирования различных аспектов осцилляционной динамики УКА как в слабых, так и в сильных ультразвуковых полях.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ в рамках Проекта В-1213.