

больших и малых плотностей массы покоя, проводятся расчеты. Направленным по радиусу излучением, учет которого возможен (Голубятников А.Н., Любошиц Д.Б. Гравитация и космология, 2016), пренебрегается. Оно рассматривается как вторичное.

Постановка такой задачи о волне аннигиляции может быть обоснована, в частности, в рамках ньютоновской механики, где однозначно известно определение энергии, необходимостью перевода части массы системы в энергию гиперболического разлета (с ненулевой скоростью на бесконечности), наблюдающегося в настоящее время, например, при расширении Вселенной. Открытие А. Риссом и др. (1998) небольшого ускорения разлета на дальних рубежах Вселенной может быть интерпретировано как достижение средствами наблюдения структуры расходящейся ударной волны. А закон однородного разлета по Э. Хабблу, как известно, типичен для задач о взрыве, даже в неоднородной среде (Л. И. Седов, 1946).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-01-00361, 17-01-00037).

Взаимодействия белков, индуцированные деформацией мембраны: мультипольный подход

¹И. Ю. Голушко, ²С. Б. Рошаль

Южный федеральный университет

¹vaniagolushko@yandex.ru

²rochal_s@yahoo.fr

Трубчатые липидные мембраны (ТЛМ), сформированные из везикул, часто используются в качестве модельных систем при изучении взаимодействий между индуцирующими кривизну белками и мембранами с развитой морфологией *in vitro*. Мы рассматриваем, вызванные деформацией клеточной мембраны, анизотропные взаимодействия между адсорбированными на поверхности ТЛМ белками. Энергия упругой деформации мембраны, рассматривается в рамках классической теории упругости липидного бислоя Хелфриха (Helfrich). Свободная энергия системы задается

выражением:

$$\Phi = \frac{k}{2} \int \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - 2C_0 \right)^2 dS + \sigma \int dS - \int \Pi(\phi, z) u_r(\phi, z) dS - FL + \Phi_{chem}$$

где k — изгибная жесткость, R_1 и R_2 — главные кривизны, а C_0 — собственная кривизна липидного бислоя (spontaneous curvature). σ — поверхностное натяжение и L — длина ТЛМ. Продольная сила приложенная к ТЛМ — F , dV and dS — дифференциалы объема и площади соответственно. $u_r(\phi, z)$ — поле радиальных смещений, $\Pi(\phi, z)$ — радиальные напряжения вызванные адсорбированными белками, Φ_{chem} — энергия химического взаимодействия между липидами мембраны и белками. Последний член учитывает, что адсорбция белков понижает общую энергию системы. Мы считаем, что вклад в энергию Φ_{chem} отрицателен и пропорционален числу адсорбированных молекул белка на поверхности ТЛМ. При этом мы полагаем, что он не зависит ни от координат прикрепления белков, ни от внешних параметров системы. Действие отдельных индуцирующих кривизну белков на липидный бислой моделируется при помощи мультиполей, представляющих собой суперпозиции точечных дельта-подобных сил. В дальнейшем вместо самих функций радиальных смещений $u_r(\phi, z)$ и напряжений $\Pi_{\phi, z}$, вызванных адсорбированными белками, мы используем их разложения по ортонормированным собственным функциям, удовлетворяющим рассматриваемым граничным условиям.

Предложенный подход, описывающий действие адсорбированных протеинов на липидный бислой при помощи мультиполей, является мощным инструментом для моделирования механических анизотропных взаимодействий между белками.

Для мультиполей, состоящих из трех или большего количества сил, поле напряжений может быть локализовано в области сравнимой с характерными размерами белковой молекулы, которые обычно меньше радиуса ТЛМ.

Наша теория позволяет сконструировать мультиполи, взаимодействующие друг с другом таким образом, что равновесное расстояние между парой мультиполей оказывается больше их размера. Таким образом, в этом случае теория не требует введения дополнительных отталкивающих потенциалов, для описания белков конечного размера.

Наряду с исследованием системы с периодическими граничными условиями, используемыми в подавляющем большинстве работ рассматривающих ТЛМ, мы проанализировали поведение шарнирно закрепленной на концах ТЛМ. В результате было показано, что на концах мембраны возникают области, в которых адсорбция белковых молекул является гораздо более энергетически выгодной, чем на остальной поверхности ТЛМ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-12-10004.

Асимптотический анализ вязких пульсаций в турбулентном пограничном слое

¹А. Р. Горбушин, ²В. Б. Заметаев

Московский Физико-Технический Институт, г. Жуковский

¹gorbushin.ar@mipt.ru

²zametaev.vb@mipt.ru

В работе построена асимптотическая теория двухмерного турбулентного пограничного слоя на плоской пластине при больших числах Рейнольдса. Подтверждено, что турбулентный пограничный слой делится на основную невязкую часть, содержащую быстрые пульсации относительно основного (осредненного) профиля продольной скорости и вязкий ламинарный подслой. Однако найдено, что вязкий ламинарный подслой не является традиционным тонким слоем, а состоит из набора малых квадратных (в том смысле, что размеры по обоим направлениям одного порядка величины) подобластей, решение в которых удовлетворяет полным уравнениям Навье-Стокса. Определены асимптотические величины толщины турбулентного пограничного слоя и ламинарного подслоя. Найден механизм взаимодействия основной, пульсационной части турбулентного пограничного слоя и малой вязкой области на обтекаемой поверхности. Это взаимодействие описывается спектром решений уравнения Гамеля с большим значением параметра и означает интенсивный обмен жидкостью между этими областями. Решение оказывается быстро осциллирующей функцией, которая описывает множество тонких струек, как втекающих в вязкую пристенную область, так и вытекающих из нее.