

Н. В. К а л я г и н а

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРЫ В ЛИПИДНОЙ  
МЕМБРАНЕ**

*Предложена математическая модель деформирования поры в липидной мембране, подверженной действию натяжений. Модель позволяет вычислить радиус поры, используя соотношение приложенных сил — натяжения мембраны и внутреннего поверхностного натяжения в поре.*

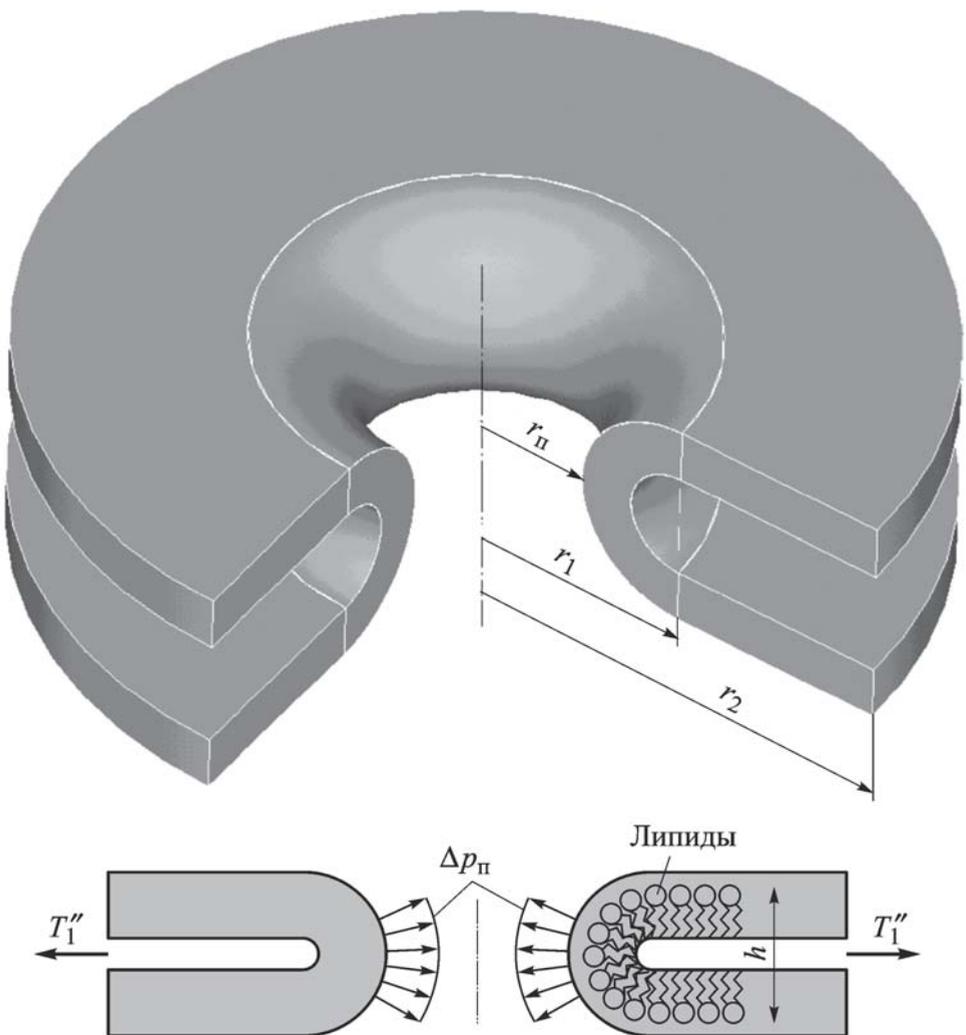
**E-mail: kn.67@mail.ru**

**Ключевые слова:** липидная мембрана, пора, натяжение, жесткость.

Исследование процесса порообразования в липидных мембранах (мембраны, образованные липидными молекулами) — актуальная задача для современных биотехнологий, в которых используется способность пор увеличивать проницаемость липидных мембран, например применение эритроцитов (верхний слой их оболочки — липидный) в качестве естественных контейнеров для фармацевтических препаратов. Липидные мембраны (как биологические, так и искусственные) имеют бислойную структуру, сформированную молекулами липидов и относятся к классу гиперупругих материалов [1]. Описание процесса разрыва оболочки эритроцита сопряжено с оценкой размера пор, возникающих в оболочке.

Образование пор в липидном слое обусловлено растягивающей нагрузкой. По мере увеличения натяжения происходит потеря устойчивости плоской формы бислойной мембраны: более тонкие участки утончаются с последующим образованием пор. Пора создает внутреннюю торообразную поверхность в липидном бислое (рис. 1). В настоящей работе приведена математическая модель для расчета деформирования поры в плоской липидной мембране под действием растягивающей нагрузки в виде натяжения и поверхностного давления, действующего на торообразную поверхность в липидном бислое, представляющая практический интерес. Постановка задачи не учитывает изгибных эффектов, поскольку они ничтожно малы, поэтому в уравнениях равновесия для торовой оболочки (внутри поверхности поры) и плоской мембраны, приведенной к однослойной, в качестве силовых факторов учитываются только натяжения [1–3].

**Расчетная схема.** В работе [1] на основании экспериментальных данных предложена модель мембраны, толщина которой  $h$  не изменяется, мембрана изотропна вдоль поверхности, поэтому соотношения упругости представляют собой зависимости между натяжениями

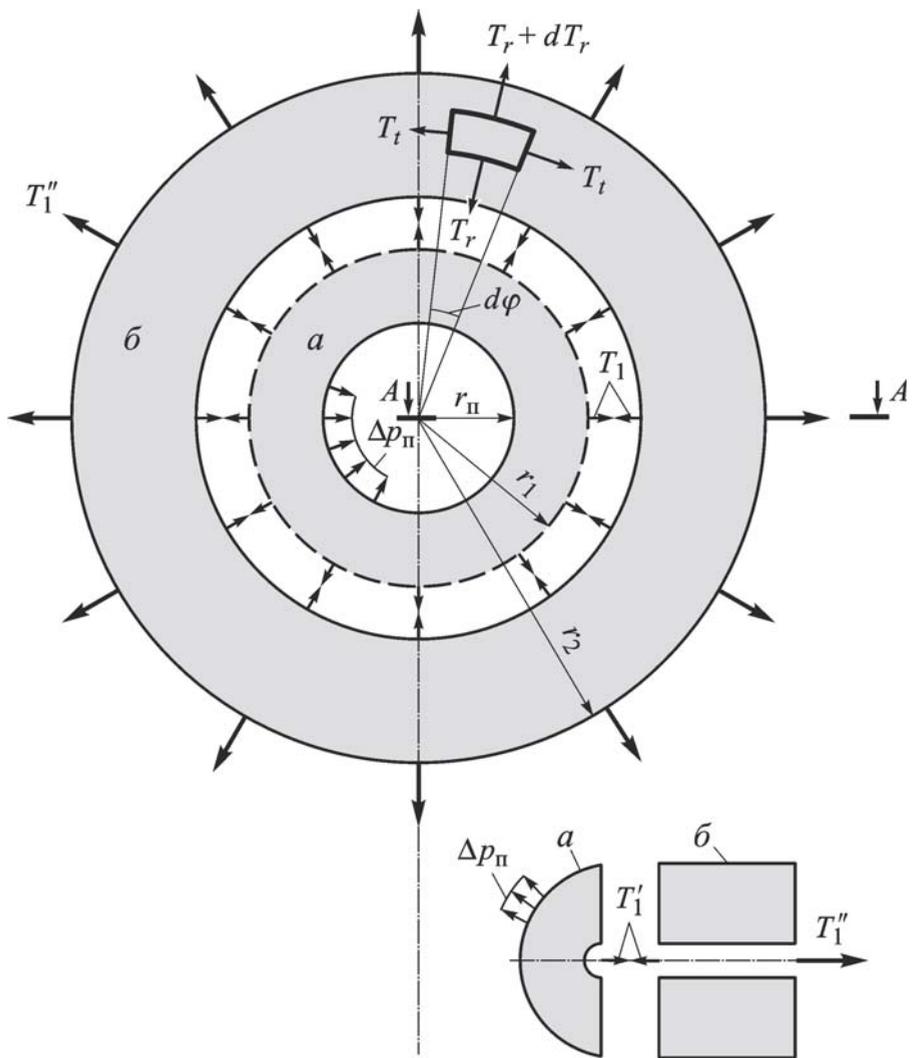


**Рис. 1. Участок липидной мембраны с порой**

и деформациями. Большинство мембран обладают большим сопротивлением растяжению поверхности и малым сопротивлением сдвигу (растяжению при постоянной площади поверхности).

Экспериментально получены механические характеристики, которые определяют два типа деформации: деформацию при постоянной площади, характеризующуюся жесткостью  $\mu = 0,007$  дин/см (называемой в литературе жесткостью на сдвиг), и изотропное растяжение, зависящее от жесткости на растяжение  $K = 150$  дин/см. Благодаря малой жесткости на сдвиг  $\mu$  мембрана легко меняет форму, при этом возможны большие деформации и перемещения и зависимость между натяжениями и деформациями носит нелинейный характер. Жесткость на растяжение на несколько порядков превышает жесткость на сдвиг, поэтому деформации растяжения малы, а натяжения прямо пропорциональны изменению площади. Рассмотренные закономерности легли в основу предлагаемого метода расчета поры в липидной мембране.

Для удобства расчета представим участок мембраны (рис. 2) площадью  $A$ , окружающий пору, областью  $a$ , формирующей поверхность поры в виде части тора (эта область образована одним слоем липидов), и областью  $b$  в виде плоского кольцевого участка мембраны

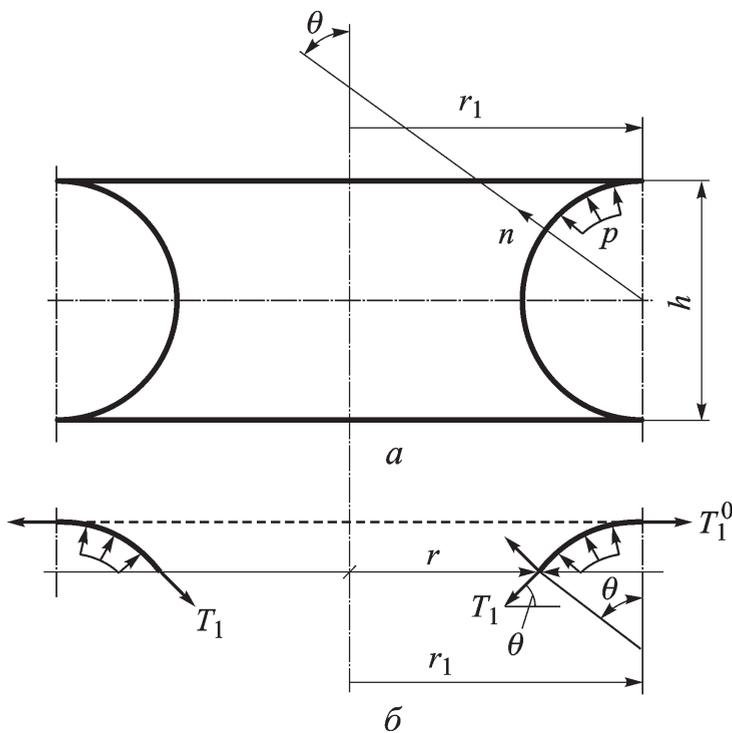


**Рис. 2. Схема расчета поры по методу сечений:**

*a* — область мембраны, образующая торообразную поверхность поры, на которую действует давление; *б* — область плоской мембраны;  $r_{II}$  — радиус поры;  $r_1$  — радиус внутренней области мембраны (стыковочный);  $r_2$  — радиус внешней области поры;  $h$  — толщина липидного бислоя;  $T_r$  — радиальное натяжение;  $T_t$  — окружное натяжение;  $T_1''$  — натяжение мембраны (радиальное);  $T_1'$  — поверхностное натяжение внутри поры (радиальное)

(состоящего из двух слоев липидов), который далее представлен как однослойная пластина толщиной  $h$ . На поверхность тора действует межфазная разность давлений  $\Delta p_{II}$ , которая вызывает натяжение  $T_1'$  и далее не изменяется. К внешней области радиусом  $r_{02}$ , определяемом экспериментально, приложено натяжение  $T_1''$ . Поверхность липидного слоя практически нерастяжима, так как жесткость на растяжение бислоя намного больше жесткости на сдвиг. Благодаря этому расчет торообразной части упрощается в предположении, что  $\Delta p_{II}$  и, соответственно,  $T_1'$  практически постоянны по величине в процессе деформирования.

Силы в нагруженной постоянным давлением торовой оболочке (рис. 3, *a*) могут быть рассчитаны на основе безмоментной теории [4]. Сила  $T_1'$  в одном липидном слое может быть найдена из условия равновесия — равенства суммы проекций на ось симметрии сил, прило-



**Рис. 3. Расчетная схема торовой оболочки:**

*a* — схема силового нагружения; *б* — внутренние силовые факторы ( $\theta$  — угол между нормалью к поверхности оболочки и осью тора)

женных к сегменту торовой оболочки (рис. 3, б):

$$T_1 \cdot 2\pi r \sin \theta = p\pi (r_1^2 - r^2);$$

$$T_1 = \frac{p (r_1^2 - r^2)}{2r \sin \theta}.$$

Учитывая, что  $r = r_1 - \frac{h}{2} \sin \theta$ , представим  $T_1$  в виде

$$T_1 = \frac{1}{2} p \frac{h}{2} \frac{2r_1 - \frac{h}{2} \sin \theta}{r_1 - \frac{h}{2} \sin \theta}.$$

Сила  $T_1$  при  $\theta = 0$  равна  $T_1 = p \frac{h}{2}$ .

Натяжение бислюя  $T_1'$  равно сумме натяжений в двух слоях:  $T_1' = 2T_1$ , а при  $\theta = 0$  в месте стыка с плоской частью  $T_1' = \Delta p_{\text{п}} h$ . Форма торообразной части остается практически постоянной благодаря большой жесткости на растяжение и постоянству величины  $\Delta p_{\text{п}}$ . Для определения радиуса поры  $r_{\text{п}}$  применяются уравнения равновесия сил, действующих в вырезанном участке оболочки в области поры. Основной вклад в изменение радиуса поры вносит деформация внешней области *б* (см. рис. 2). Для того чтобы определить внутренний радиус поры  $r_{\text{п}}$ , вычислим радиус отверстия деформированной плоской части мембраны  $r_1$  и вычтем радиус торообразной части, равный

половине толщины бислоя  $h/2$ :

$$r_{\text{II}} = r_1 - h/2.$$

Для определения радиуса  $r_1$  рассмотрим плоскую часть липидной мембраны. Составим уравнение равновесия для элемента, вырезанного радиальными и окружными сечениями области вокруг поры (рис. 4), в актуальном (деформированном) состоянии.

Проектируя силы на радиальное направление, получим

$$\frac{d(T_r r)}{dr} - T_t = 0,$$

или

$$\frac{d(T_r)}{dr} r + T_r - T_t = 0. \quad (1)$$

Чтобы определить зависимость деформации поры от натяжения воспользуемся соотношениями упругости, полученными в работе [1] методами термомеханики, на основе выражения для плотности упругой энергии в виде

$$F = \mu\beta + \frac{1}{2}K\alpha^2. \quad (2)$$

Две функции  $\alpha$  и  $\beta$  полностью характеризуют геометрическую природу деформации:  $\alpha$  — относительное изменение площади элемента поверхности, а  $\beta$  — относительное изменение формы элемента (длин сторон). Как было сказано ранее, деформация  $\alpha$  незначительна, поэтому рассмотрим два варианта расчета: первый, когда  $\alpha = 0$  и второй — с учетом второго слагаемого в уравнении (2).

Тела, у которых  $F$  пропорциональна первой степени параметра  $\beta$ , — гиперупругие, поэтому для вывода соотношений упругости применимы методы нелинейной механики. Деформации в таких случаях описываются степенями удлинения  $\lambda$ , которое равно отношению отрезка после деформации  $\ell$  к его первоначальной длине  $\ell_0$ , т.е.  $\lambda = \frac{\ell}{\ell_0}$ .

Вывод соотношений упругости из выражения (2) методом нелинейной теории упругости [5] для гиперупругого тела с несжимаемым объемом, дает те же соотношения упругости, что и полученные методами термомеханики в работе [1].

**Вычисление радиуса поры в липидной мембране в случае неизменной площади деформации ( $F = \mu\beta$ ).** Рассмотрим малый элемент пластинки единичной длины. Предположим, что толщина мембраны

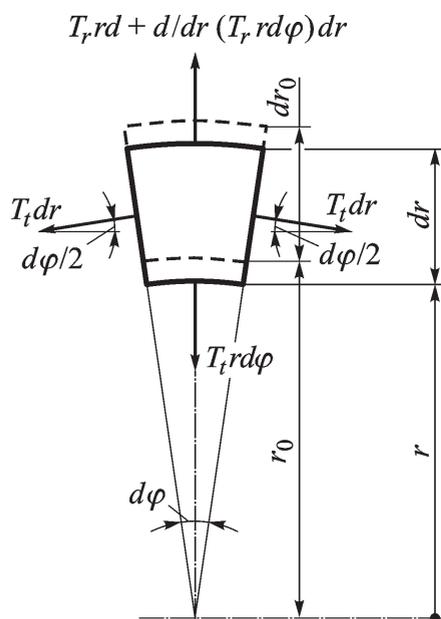


Рис. 4. Расчетная схема элемента поверхности

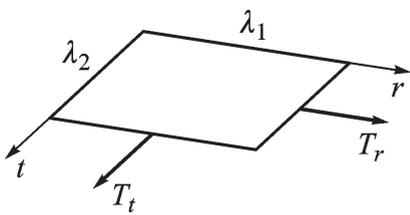


Рис. 5. Расчетная схема элемента поверхности

при деформации не меняется; после деформации длины сторон элемента равны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (рис. 5). Тогда

$$-\alpha = \lambda_1 \lambda_2 - 1, \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) - 1.$$

На стадии деформирования с постоянной площадью  $\alpha = 0$ , поэтому упругий потенциал приобретает вид

$$F = \mu \beta = \frac{\mu}{2} \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) - 1. \quad (3)$$

При деформировании элемента его стороны получают виртуальные удлинения  $\delta \lambda_1$  и  $\delta \lambda_2$ , приложенные к сторонам элемента силы совершат удельную работу  $\delta v = T_r \lambda_2 \delta \lambda_1 + T_t \lambda_1 \delta \lambda_2$ , а удельная потенциальная энергия деформации (упругий потенциал) получит приращение  $\delta F = \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} \delta \lambda_1 + \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} \delta \lambda_2$ . Приравнявая  $\delta v$  к  $\delta F$ , имеем

$$\left( T_r \lambda_2 - \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} \right) \delta \lambda_1 + \left( T_t \lambda_1 - \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} \right) \delta \lambda_2 = 0. \quad (4)$$

Так как на стадии деформирования с постоянной площадью  $\alpha = 0$ , то  $\lambda_1 \lambda_2 = 1$  и

$$\lambda_1 \delta \lambda_2 + \lambda_2 \delta \lambda_1 = 0.$$

Подставляя выражение  $\delta \lambda_1 = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \delta \lambda_2$  в (4), получаем

$$\left( -T_r \lambda_1 + \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + T_t \lambda_1 - \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} \right) \delta \lambda_2 = 0.$$

В силу произвольности выбора  $\delta \lambda_2$  окончательно получаем выражения для  $T_r$  и  $T_t$  с точностью до аддитивной постоянной  $\check{T}$  (что является результатом неизменности площади поверхности) в виде

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} + \check{T}, \\ T_t &= \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} + \check{T}. \end{aligned} \quad (5)$$

Продифференцировав выражение для упругого потенциала (3) по  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и подставив в уравнения (5) с учетом равенства  $\lambda_1 \lambda_2 = 1$ , получим

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + \check{T}, \\ T_t &= -\frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + \check{T}. \end{aligned} \quad (6)$$

Величина  $\check{T}$  является изотропным натяжением:  $\check{T} = K\alpha$ . Этот результат можно получить из выражения (2), если не делать предположения о постоянстве площади ( $\alpha = 0$ ). Поскольку деформация площади мала, значение  $\check{T}$  также мало, что будет показано далее.

Условие неизменности элемента площади поверхности имеет вид

$$r_0 d\varphi dr_0 = r d\varphi dr. \quad (7)$$

Индекс 0 соответствует недеформированному состоянию. В качестве независимых переменных приняты координаты  $r_0$ , а описание напряженно-деформированного состояния проводится в координатах Лагранжа. С учетом (7) радиальная ( $\lambda_1$ ) и окружная ( $\lambda_2$ ) деформации определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \frac{r}{r_0}; \\ \lambda_1 &= \frac{dr}{dr_0} = \frac{r_0}{r} \quad \left( \lambda_1 \lambda_2 = 1 \Rightarrow \lambda_1 = \frac{1}{\lambda_2} = \frac{r_0}{r} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Подставив соотношения (8) в (6), т.е.

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + \check{T} = \frac{\mu}{2} \left( \frac{r_0^2}{r^2} - \frac{r^2}{r_0^2} \right) + \check{T}, \\ T_t &= -\frac{\mu}{2} (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + \check{T} = -\frac{\mu}{2} \left( \frac{r_0^2}{r^2} - \frac{r^2}{r_0^2} \right) + \check{T}, \end{aligned}$$

и далее в (1), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dT_r}{dr} = \mu \left( \frac{r}{r_0^2} - \frac{r_0^2}{r^3} \right),$$

которое с учетом  $dr = \frac{r_0}{r} dr_0$  примет вид

$$\frac{dT_r}{dr_0} = \mu \left( \frac{1}{r_0} - \frac{r_0^3}{r^4} \right). \quad (9)$$

Таким образом, разрешающая система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние мембраны в окрестности поры, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dT_r}{dr_0} &= \mu \left( \frac{1}{r_0} - \frac{r_0^3}{r^4} \right); \\ \frac{dr}{dr_0} &= \frac{r_0}{r} \end{aligned} \quad (10)$$

Для расчета используются граничные условия

$$\begin{aligned} T_r(r_{01}) &= T'_1, \\ T_r(r_{02}) &= T''_1, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $r_{02}$  — известный из эксперимента радиус внешней границы области, на которой задано значение  $T_r(r_{02}) = T_1''$ .

Интегрируя второе уравнение системы (10), получим зависимость для определения координаты точки после деформации при условии постоянства площади деформирования:

$$r^2 = r_0^2 + C_1. \quad (12)$$

После интегрирования первого уравнения системы (10) с учетом (12), получаем выражение для определения  $T_r$ :

$$T_r(r_0) = \mu \ln r_0 - \frac{\mu C_1}{2(r_0^2 + C_1)} + C_2. \quad (13)$$

Подставив далее граничные условия (11) в (13), получим систему уравнений для определения неизвестных  $C_1, C_2$ :

$$\begin{aligned} T_1' &= \mu \ln \frac{r_{01}}{\sqrt{r_{01}^2 + C_1}} - \frac{\mu C_1}{2(r_{01}^2 + C_1)} + C_2, \\ T_1'' &= \mu \ln \frac{r_{02}}{\sqrt{r_{02}^2 + C_1}} - \frac{\mu C_1}{2(r_{02}^2 + C_1)} + C_2. \end{aligned} \quad (14)$$

Значения внутреннего и наружного радиусов после процесса деформирования определяются по формуле (12):

$$r_1 = \sqrt{r_{01}^2 + C_1}, \quad r_2 = \sqrt{r_{02}^2 + C_1}. \quad (15)$$

При вычислении  $r_1$  в случае бесконечной области задается такое  $r_{02}$ , чтобы при дальнейшем увеличении значения  $r_{02}$  расчетное значение  $r_1$  отличалось от предыдущего на величину, не превышающую заданной погрешности  $\epsilon$ .

Решение системы уравнений (14) относительно  $C_1$  и  $C_2$  выполнено с помощью программного обеспечения Maple при использовании экспериментальных данных работы [1]:  $r_{01} = 0,002$  мкм;  $r_{02} = 40$  мкм;  $\mu = 0,007$  дин/см;  $T_1' = 6$  дин/см. Результаты расчета приведены в таблице, из которой следует, что при  $T_1'' < T_1'$  значение радиуса  $r_1$  становится меньше начального значения  $r_{01}$  и при этом  $C_1 < 0$ . При  $T_1' = T_1''$  значение радиуса  $r_1$  равно начальному, а при  $T_1'' > T_1'$   $r_1 > r_{01}$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что при  $T_1'' < T_1'$  пора сжимается, при  $T_1' = T_1''$  имеет место стабилизация радиуса поры, а при  $T_1'' > T_1'$  пора быстро расширяется.

На рис. 6 приведен график зависимости  $\lambda = r_n/r_{01}$  от отношения натяжений  $T_1''/T_1'$  для разных значений сдвиговой жесткости  $\mu$ . При вычислениях использованы экспериментальные значения  $r_{01} = 0,002$  мкм,  $r_{02} = 40$  мкм,  $\mu = 0,007$  дин/см,  $T_1' = 6$  дин/см,  $\frac{h}{2} = 0,002$  мкм. Из рис. 6 видно, что с уменьшением  $\mu$  значение радиуса поры увеличивается.

$T_1''/T_1'$	$\alpha = 0$				$\alpha \neq 0,$	
	$C_1, \text{мкм}^2$	$C_2, \text{дин/мкм}$	$r_1, \text{мкм}$	$\lambda_2, \text{отн.ед}$	$r_1, \text{мкм}$	$\lambda_2, \text{отн.ед}$
0,99743	$-0,3004 \cdot 10^{-5}$	$0,5985 \cdot 10^{-3}$	$0,99806 \cdot 10^{-3}$	0,499	$0,100 \cdot 10^{-2}$	0,51
0,99900	$-0,2014 \cdot 10^{-5}$	$0,5994 \cdot 10^{-3}$	$0,14093 \cdot 10^{-2}$	0,705	$0,142 \cdot 10^{-2}$	0,71
1,00000	$0,2359 \cdot 10^{-9}$	$0,6000 \cdot 10^{-3}$	$0,20000 \cdot 10^{-2}$	1,00	$0,204 \cdot 10^{-2}$	1,02
1,00285	$0,948 \cdot 10^{-3}$	$0,6017 \cdot 10^{-3}$	$0,141 \cdot 10^{-1}$	7,05	$0,16 \cdot 10^{-1}$	8,00
1,00473	$0,4915 \cdot 10^{-2}$	$0,6284 \cdot 10^{-3}$	$0,713 \cdot 10^{-1}$	35,07	$0,80 \cdot 10^{-1}$	0,40
1,006655	0,1326	$0,6049 \cdot 10^{-3}$	0,364	182,07	40,00	200,00

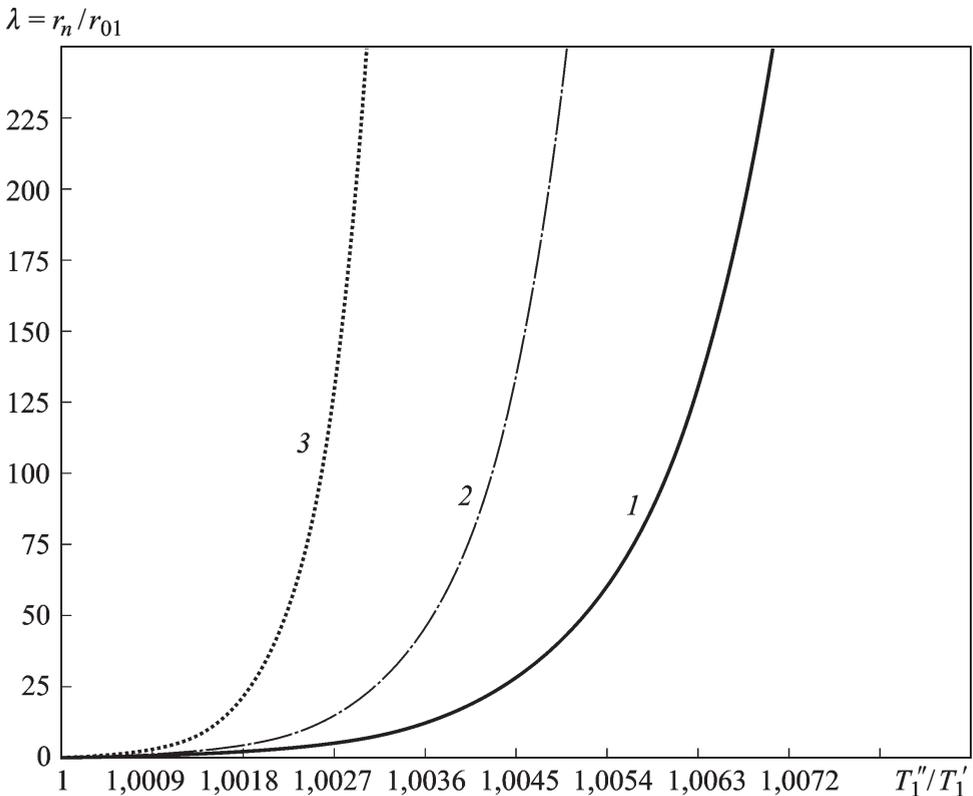
**Вычисление радиуса поры с учетом растяжения площади поверхности**  $\left(F = \mu\beta + \frac{1}{2}K\alpha^2\right)$ . Соотношения упругости находятся из выражения для упругого потенциала, в котором учтено изменение площади:

$$F = \mu\beta + \frac{1}{2}K\alpha^2. \quad (16)$$

Используя (16), получаем

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{\mu}{2} (\lambda_2^{-2} - \lambda_1^{-2}) + K (\lambda_1 \lambda_2 - 1), \\ T_t &= -\frac{\mu}{2} (\lambda_2^{-2} - \lambda_1^{-2}) + K (\lambda_1 \lambda_2 - 1). \end{aligned} \quad (17)$$

Разрешающую систему уравнений для определения  $r$  и  $T_r$  находим из



**Рис. 6.** График зависимости  $\lambda\left(\frac{T_1''}{T_1'}\right)$  при  $\mu=0,003$  (1),  $0,005$  (2),  $0,007$  дин/см (3)

уравнений равновесия (1) и соотношений упругости (17) в виде

$$\frac{dT_r}{dr_0} = \mu \left( \frac{\left(\frac{dr}{dr_0}\right)^{-1}}{r} - \left(\frac{dr}{dr_0}\right) \frac{r_0^2}{r^3} \right), \quad (18)$$

$$\frac{dr}{dr_0} = \frac{r_0}{r} \left( 1 + \frac{T_r}{K} - \frac{\mu}{2K} \left( \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-2} - \left(\frac{dr}{dr_0}\right)^{-2} \right) \right).$$

Для вычисления радиуса поры необходимо проинтегрировать систему уравнений (18) с начальными условиями

$$\begin{aligned} T_r(r_{01}) &= T_1'; \\ r(r_{01}) &= r_1, \end{aligned} \quad (19)$$

где значение  $r_1$  выбирается таким, чтобы  $T_r(r_{02}) = T_1''$ . Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (18) с начальными условиями (19) получено с использованием программного комплекса Maple и экспериментальных данных работы [1]:  $r_{01} = 0,002$  мкм,  $\mu = 0,007$  дин/см,  $K = 150$  дин/см,  $T_1' = 6$  дин/см. Результаты расчета приведены в таблице и на рис. 7.

Из таблицы (случай  $\alpha \neq 0$ ) и рис. 7 следует, что решения систем уравнений (14) и (18) практически совпадают для случая бесконечной области. Таким образом, учет слагаемого  $\ddot{T} = K\alpha$  в выражениях

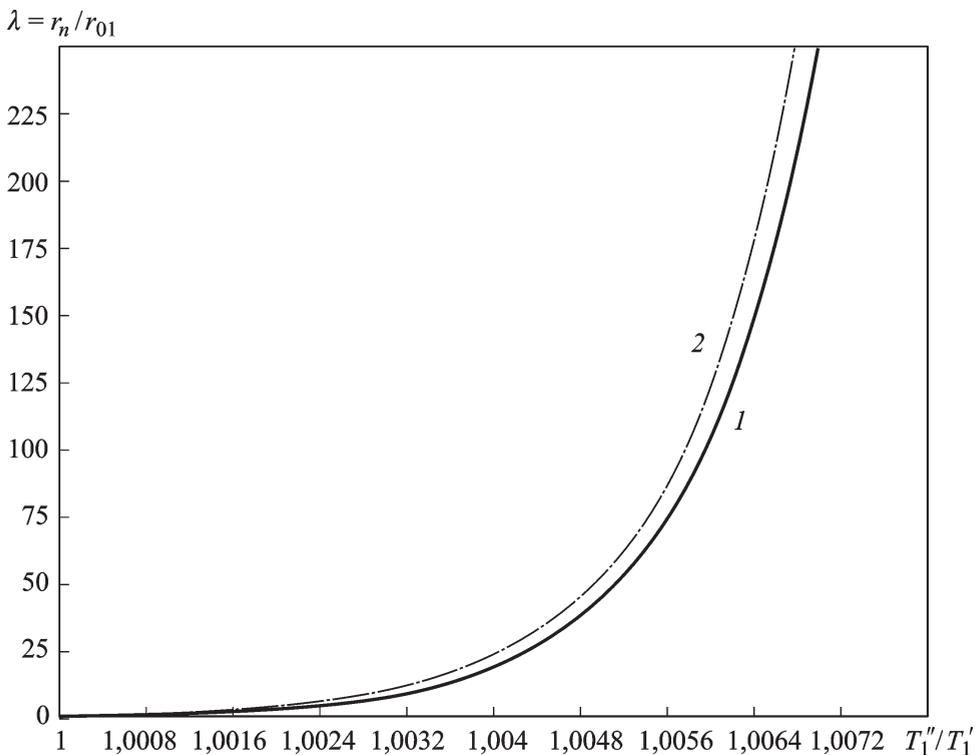


Рис. 7. Зависимости относительного радиуса поры  $\lambda\left(\frac{T_1''}{T_1'}\right)$ , полученные из систем уравнений (14) ( $\alpha = 0$ , кривая 1) и (18) ( $\alpha \neq 0$ , кривая 2)

для натяжений (17) практически не влияет на процесс деформирования поры, который в данном случае осуществляется за счет деформации, происходящей без изменения площади поверхности. Для случая конечной области, когда  $r_{02}$  соизмеримо с  $r_{01}$ , расчет радиуса поры необходимо проводить с использованием системы уравнений (18).

**Выводы.** Получены системы уравнений, позволяющие вычислить радиус поры в липидной мембране в зависимости от соотношения натяжений внутри и снаружи поры с учетом жесткости на сдвиг и растяжение. Показано, что учет деформации площади поверхности липидной мембраны слабо влияет на процесс деформации поры в случае бесконечной области. Параметром, контролирующим процесс порообразования в липидной мембране, является жесткость на сдвиг  $\mu$ , так как изменение радиуса поры происходит за счет деформации, происходящей без изменения площади поверхности. Значения радиуса поры с достаточной точностью можно определять с помощью зависимостей для случаев бесконечной области с порой (система уравнений (14)) и конечного размера мембраны с порой (система уравнений (18)).

Определены условия стягивания, стабилизации и быстрого растяжения поры в зависимости от соотношения натяжений внутри ( $T_1'$ ) и снаружи ( $T_1''$ ) поры: при  $T_1'' < T_1'$  пора стягивается, при  $T_1'' = T_1'$  имеет место стабилизация радиуса поры, при  $T_1'' > T_1'$  пора быстро расширяется.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И в е н с И., С к е й л а к Р. Механика и термодинамика биологических мембран: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 352 с.
2. Н а р а й к и н О. С., К а л я г и н а Н. В. Математическая модель эритроцита / Сб. тр. межд. 6 науч.-техн. конф. “Медико-технические технологии на страже здоровья”. – М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 239–247.
3. К а л я г и н а Н. В., Н а р а й к и н О. С., Е р ш о в Ю. А., Р у т к о в с к и й О. В. Метод расчета формоизменения эритроцита с учетом изгибной жесткости // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2007. – № 10. – С. 58–61.
4. Б и д е р м а н В. Л. Механика тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с.
5. Р а с ч е т ы на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев и др. – М.: Машгиз, 1958. – Т. 2. – 974 с.

Статья поступила в редакцию 22.12.2011

Надежда Вячеславовна Калягина окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1991 г. Ассистент кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 10 научных работ в области прикладной механики и биомеханики.

N.V. Kalyagina graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1991. Assistant lecturer of “Applied Mechanics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 10 publications in the field of applied mechanics and biomechanics.