

# РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 632.985.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ КРИОКОНСЕРВИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Кунденко Н. П.<sup>1</sup>, Кунденко А. Н.<sup>1</sup>, Анне Енсен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко  
<sup>2</sup>Дания, 7830 Виндеруп, ВАЕКГААРД ДРИФТ АПС

*Определены теоретические зависимости изменения коэффициента вязкости криоконсервирующей среды с биологическими объектами при воздействии внешних акустических колебаний.*

**Постановка проблемы.** Известно, что одним из основных механизмов диффузии частиц криоконсервирующей среды к поверхности биологического объекта (эмбрион, спермий) являются микропотоки, возникающие под действием акустических колебаний.

Наличие этих микропотоков означает отличие от нуля среднего по времени потока массы. Величина постоянной составляющей скорости (предполагается, что при отсутствии акустических колебаний криоконсервирующая среда покоилась) микропотока меньше амплитуды колебательной скорости в акустической волне. Это обстоятельство позволяет в качестве математической модели, описывающей микропотоки вблизи поверхности биологического объекта, использовать уравнения гидродинамики вязкой сжимаемой жидкости.

Наличие микропотоков у поверхности биологического объекта существенным образом влияет на процесс диффузии частиц криоконсервирующей среды [1]. Эти микропотоки осуществляют перенос частиц криоконсервирующей среды к поверхности биологического объекта.

Математическое описание процесса массопередачи может быть проведено в рамках диффузионной кинетики. Многочисленные экспериментальные результаты [2, 3] показывают, что процесс массопередачи определяется диффузией, возникающей вследствие наличия разности концентраций между слоем среды, непосредственно примыкающим к поверхности биологического объекта (эмбрион, спермий) и толщиной среды.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В предыдущих подразделах было установлено, что при воздействии акустических волн на криоконсервирующую среду, содержащую биологический объект (эмбрион, спермий), возникают микропотоки в малой окрестности биологического объекта. Наличие этих микропотоков вызывает увеличение концентрации частиц криоконсервирующей среды у поверхности биологического объекта. Это приводит к тому, что у поверхности биологического объекта образуется пограничный слой частиц криоконсервирующей среды с плотностью, отличающейся от плотности крио – консервирующей среды при отсутствии акустических волн.

С гидродинамической точки образование такого слоя у поверхности биологического объекта эквивалентно увеличению его объема.

В этом случае следует ожидать, что криоконсервирующая среда с биологическими объектами будет иметь различающиеся гидродинамические параметры до воздействия на нее акустических волн и после такого воздействия.

**Цель статьи.** Провести исследования изменения коэффициента вязкости криоконсервирующей среды при воздействии акустических колебаний.

**Основные материалы исследования.** Будем рассматривать криоконсервирующую среду, содержащую биологический объект (эмбрион, спермий), на которую воздействует акустическая волна с потенциальной функцией.

Под воздействием этой волны в окрестности граничной поверхности биологического объекта возникают стационарные микропотоки. Как было доказано [4], скорость этих микропотоков может быть получена методом возмущения применительно к усредненным по времени уравнениям вязкой сжимаемой жидкости. В случае биологического объекта – эмбрион скорости микропотока имеет следующий вид

$$\bar{V}_{r2} = - \frac{R^2 A^2 k_0 (\alpha^2 + k_0^2)}{2 \omega \rho_0^2 r^2} e^{-2\alpha r} + \frac{D_1}{r^2}, \quad (1)$$

где

$$D_1 = \frac{R^2 A^2 k_0 (k_0^2 + \alpha^2)}{2 \omega \rho_0^2} e^{-2\alpha R} + \frac{(\alpha R + 1) R A e^{-\alpha R}}{\rho_0}, \quad (2)$$

где  $R$  - радиус шара моделирующего эмбрион;  
 $\omega$  - частота возбуждающей акустической волны;  
 $A$  - амплитуда потенциальной функции этой волны,  
 $\alpha$  и  $\rho_0$  - соответственно коэффициент затухания и плотность криоконсервирующей среды.

Остальные компоненты скорости микропотока равны нулю ( $\bar{V}_{\theta 1} = \bar{V}_{\phi 2} = 0$ ,  $r, \Theta, \phi$  - сферические координаты, связанные с биологическим объектом).

В случае биологического объекта – спермий скорость микропотока может быть представлена в виде

$$\bar{V}_{\xi 2} = - \frac{A^2 B^2 e^{-2\alpha c \xi} k_0 (k_0^2 + \alpha^2)}{8 \rho_0^2 \omega (\xi^2 - \eta^2) c^2} + \frac{D_2}{\sqrt{(\xi^2 - \eta^2)(\xi^2 - 1)}}, \quad (3)$$

где

$$D_2 = \sqrt{(\xi_0^2 - \eta^2)(\xi_0^2 - 1)} \frac{AB e^{-\alpha c \xi_0}}{2\rho_0 c^2} \left[ \frac{1}{\xi_0} \left( \frac{1}{\xi_0} + c\alpha \right) + \frac{AB e^{-\alpha c \xi} k_0(k_0^2 + \alpha^2)}{4\omega\rho_0(\xi_0^2 - \eta^2)} \right]. \quad (4)$$

В результате проведенных исследований [4, 5] определяется эффективный коэффициент вязкости среды образованной криоконсервирующей средой и биологическими объектами эмбрион или спермий. Будем полагать, что такая сложная среда занимает некоторый объем  $V_0$ . Поскольку рассматриваемые биологические объекты имеют достаточно малые геометрические размеры, то естественно считать, что влияние сил тяжести и инерции на их движение пренебрежимо мало. Следовательно, можно предположить, что биологические объекты локально движутся вместе с окружающей их криоконсервирующей средой. Кроме того, будем предполагать, что среднее расстояние между биологическими объектами велико по сравнению с их линейными размерами. Поэтому процесс образования микропотока вблизи одного биологического объекта приближенно не зависит от существования других и полностью определяется возбуждающей акустической волной. В этом случае можно воспользоваться результатами, приведенными в [4, 5] и получить следующее выражение для эффективного коэффициента вязкости жидкости, образованной криоконсервирующей средой и биологическими объектами

$$\bar{\eta} = \eta \left[ 1 + \beta \frac{\eta + \frac{5}{2}\eta_1}{\eta + \eta_1} \right], \quad (5)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости криоконсервирующей среды;

$\eta_1$  - коэффициент вязкости одного биологического объекта;

$\beta = V_1/V_0$  - коэффициент объемной концентрации биологических объектов;

$V_1$  - объем, занимаемый биологическими объектами.

В дальнейшем будем пренебрегать коэффициентом вязкости биологического объекта  $\eta_1 = 0$ . Тогда формула (5) примет вид

$$\bar{\eta} = \eta(1 + \beta). \quad (6)$$

Из (6) следует, что эффективный коэффициент вязкости больше, чем коэффициент вязкости криоконсервирующей среды без биологических объектов в  $\beta$  раз.

Воспользуемся формулой (6) и выясним, как изменяется эффективный коэффициент вязкости при взаимодействии акустической волны с криоконсервирующей средой, содержащей биологические объекты.

Рассмотрим вначале случай криоконсервирующей среды с эмбрионами, которые моделируются геометрическими телами в виде шара с радиусом  $R$ . Пусть  $N_3$  - число эмбрионов находящихся в криоконсервирующей среде. Будем полагать, что криоконсервирующая среда с эмбрионами заполняет кювету в виде круглого цилиндра с высотой  $h$  и радиусом  $R_0$ . Тогда объем  $V_0 = \pi R_0^2 h$ . Определим коэффициент объемной концентрации эмбрионов при отсутствии акустической волны. Имеем

$$\beta_3 = \frac{4N_3 R^3}{3R_0^2 h}. \quad (7)$$

Из (6) получаем выражение для эффективного коэффициента вязкости жидкости, образованной криоконсервирующей средой и эмбрионами

$$\eta_3 = \eta \left( 1 + \frac{4N_3 R^3}{3R_0^2 h} \right). \quad (8)$$

Пусть теперь на криоконсервирующую среду с эмбрионами воздействует акустическая волна. Как уже было отмечено выше, в окрестности биологических объектов (эмбрионов), вследствие возникновения микропотоков, образуется пограничный слой частиц криоконсервирующей среды определенной толщины  $\delta$ . Как показано в [4], толщину этого пограничного слоя приближенно можно оценить по следующей формуле

$$\delta \cong \sqrt{\frac{\eta L}{\rho_0 \bar{V}_3}}, \quad (9)$$

где  $\eta$  - коэффициент вязкости криоконсервирующей среды без эмбрионов;

$\rho_0$  - плотность в отсутствие акустической волны;

$L$  - характерный линейный размер эмбриона, в качестве которого можно выбрать величину  $L = 2R$ ,  $\bar{V}_3$  - средняя по времени скорость микропотока у поверхности эмбриона. Как установлено [7], средняя скорость микропотока имеет вид

$$\bar{V}_3 = \frac{A e^{-\alpha R}}{\rho_0 R} (1 + \alpha R), \quad (10)$$

где  $A$  - амплитуда акустической волны;

$\alpha$  - коэффициент затухания криоконсервирующей среды.

$$\alpha = \frac{8\pi^2 f^2 \eta}{3c_0^2 \rho_0}, \quad (11)$$

где  $f$  - частота возбуждающей акустической волны;

$c_0$  и  $\rho_0$  - соответственно скорость звука и плотность криоконсервирующей среды.

Так как линейный размер эмбриона мал, то можно считать, что  $\alpha R \ll 1$ . Тогда получаем зависимость

$$\bar{V}_3 \cong \frac{A}{\rho_0 R}. \quad (12)$$

С точностью до членов порядка  $(\alpha R)^2$ .

Подставляя полученные зависимости, получаем следующее выражение для толщины пограничного слоя эмбриона

$$\delta \cong R \sqrt{\frac{2\eta}{A}}. \quad (13)$$

Формула (13) справедлива с точностью до членов порядка  $(\alpha R)^2$ .

Таким образом, можно полагать, что при наличии акустических колебаний изменяется объем занимаемый эмбрионами

$$V_{\text{э1}} = \frac{4N_3 \pi (R + \delta)^3}{3}. \quad (14)$$

Следовательно, коэффициент объемной концентрации эмбрионов так же изменяется

$$\bar{\beta}_3 = \frac{4N_3 \pi (R + \delta)^3}{3\pi R_0^2 h} = \frac{4N_3 R^3 \left(1 + 3\sqrt{\frac{2\eta}{A}}\right)}{3R_0^2 h}. \quad (15)$$

Получим выражение для эффективного коэффициента вязкости криоконсервирующей среды с эмбрионами, на которую воздействует акустическая волна

$$\bar{\eta}_3 = \eta \left[ 1 + \frac{4N_3 \left(1 + 3\sqrt{\frac{2\eta}{A}}\right) R^3}{3R_0^2 h} \right]. \quad (16)$$

Проведем сравнение

$$\bar{\eta}_3 - \eta_3 = \eta \frac{4N_3 \sqrt{\frac{2\eta}{A}} R^3}{R_0^2 h} = \eta \beta_3 \sqrt{\frac{2\eta}{A}}. \quad (17)$$

**Выводы.** В результате проведенных теоретических исследований установлено, что при воздействии акустической волны на криоконсервирующую среду с эмбрионами эффективный коэффициент вязкости увеличивается.

## Список использованных источников

1. Кунденко Н. П. Особенности распространения ультразвука в биологической среде / Н. П. Кунденко // Вісник ТДАТУ. – 2011. – Вип. 11. – Том 4. – С. 181-186.
2. Акустичні технології в процесі криоконсервації біологічних об'єктів / М. П. Кунденко, О. Ю. Єгорова, І. М. Шинкаренко, К. Ю. Бровко, І. І. Бородай // П International Scientific and Practical Conference "Modern Methodology of Science And Education" (February 19, 2018). - Open Access Peer-reviewed journal. – Science Review. – RS Global. – 2(9). - Vol. 2. – Warsaw, Poland, 2018. – P. 9-13.
3. Кунденко Н. П. Исследования криоконсервации микрообъектов крупного рогатого скота / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – 2011. – Вип. 34/2012. – С. 156-160.
4. Кунденко Н. П. Расчет колебательной скорости и звукового давления в окрестности границы биологического объекта / Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/5 (56). – С. 29 – 32.
5. Кунденко Н. П. Расчет скорости микропотока у поверхности шара, моделирующего эмбрион / Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 1/4 (55). – С. 66 – 68.
6. Кунденко Н. П. Математическое моделирование процесса воздействия акустического поля на криоконсервирующую среду с биологическим объектом / Н. П. Кунденко // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України", (20-21 жовтня 2011). – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2011. – Вип. 117. – С. 140 – 142.

## Анотація

### ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІН КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ КРІОКОНСЕРВУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА З БІОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Кунденко М. П., Кунденко О. М., Анне Енсен

*Визначено теоретичні залежності зміни коефіцієнта в'язкості криоконсервуючого середовища з біологічними об'єктами при впливі зовнішніх акустичних коливань.*

## Abstract

### DETERMINATION OF CHANGES IN THE COEFFICIENT OF VISCOSITY OF CRYOCONSERVATIVE MEDIA WITH BIOLOGICAL OBJECTS

N. Kundenko, A. Kundenko, Anne Jensen

*The theoretical dependences of changes in the viscosity coefficient of a cryopreservation medium with biological objects under the influence of external acoustic oscillations are determined.*