

напій+цукор+янтарна, кислота+гідратовані фулерени», з концентрацією ЕСО продукту 5 %, соку з м'якоттю 25 %, цукру 10 %, янтарної кислоти 0,3 % та гідратованих фулеренів 10%.

### **Висновки.**

Внесення до складу функціонального напою наносировини та біологічно активних добавок на основі зернопродуктів не погіршує технологічної складової напоїв.

Використання гідратованих фулеренів в складі нової рецептури напоїв разом з янтарною кислотою не погіршує органолептичні показники напоїв, може підвищувати енергетичний стан організму та виконувати роль профілактичного засобу для різних верств населення.

**Список літератури:** 1. *Ахмедов, А.У.* Безалкогольные напитки, богатые йодом и биологически активными веществами // Пиво и напитки. - 2003. - № 2.-С. 76. . *Беличенко, А.М.* Перспективы развития безалкогольной отрасли // Пиво и напитки. - 2007. - № 3. - С. 11-13. 3. *Гореликова, Г. А.* Использование системного подхода при обогащении пищевых продуктов незаменимыми микронутриентами // Пищевая промышленность. - 2003. - № 11. - С. 70-73. 4. *Макарова, Е.В.* Формирование качества сиропов на основе растительного сырья и их товароведная характеристика : автореф. дис.канд. техн. наук : -Владивосток, 2004. - 23 с. 5. *Barbosa - Canovas G.V.* Adaptation of classical processes to new technical developments and quality requirements / G.V. Barbosa -Canovas, P.J. Juliano // Food Sei. - 2004. -№ 5. - P. 240-250.

*Поступила в редколлегию 09.01.2012*

**УДК 621.317**

**Н.П. КУНДЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ХНТУСХ им. П.Васленко, Харьков

### **РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ КРИО–КОНСЕРВИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Запропоновано методика розрахунку коефіцієнта в'язкості середовища, при дії акустичної хвилі, утвореної біологічними об'єктами і крию - консервуючим середовищем.

**Ключові слова:** коефіцієнт в'язкості, мікропотоки, ембріон, акустика

Предложено методика расчета коэффициента вязкости среды, при воздействии акустической волны, образованной биологическими объектами и крио – консервирующей средой.

**Ключевые слова:** коэффициент вязкости, микропоток, эмбрион, акустика.

Proposed method for calculating the coefficient of viscosity of the medium under the influence of acoustic waves formed by biological objects and cryo - preserving the environment.

**Keywords:** coefficient of viscosity, microflow, the embryo, the acoustics

### **Постановка проблемы**

Эффект увеличения криорезистивности получен на весьма ограниченном наборе биологических объектов: половых клетках и безъядерных клетках крови [3]. Практически не освещены возможности использования ультразвука при криоконсервировании спермиев сельскохозяйственных животных. Не

исследованы и механизмы ультразвукового воздействия на криобиологические системы. Учитывая это, целесообразно исследовать возможные механизмы воздействия ультразвуковых волн с целью оптимизации условий низкотемпературного консервирования таких биологических объектов как сперма сельскохозяйственных животных. Это позволит повысить эффективность способов замораживания и отогрева биологических объектов (спермии, эмбрионы и т.п.) и выявить подходы к использованию ультразвуковых волн при криоконсервировании биологических объектов. Существенным вопросом при этом является возможность физико-математического описания взаимодействия ультразвуковых волн с криоконсервирующей средой, содержащей биологические объекты.

#### **Анализ последних исследований**

Известно, что при воздействии акустических волн на крио – консервирующую среду, содержащую биологический объект (эмбрион, спермий), возникают микропотоки в малой окрестности биологического объекта [1, 2]. Наличие этих микропотоков вызывает увеличение концентрации частиц крио – консервирующей среды у поверхности биологического объекта. Это приводит к тому, что у поверхности биологического объекта образуется пограничный слой частиц крио – консервирующей среды с плотностью, отличающейся от плотности крио – консервирующей среды при отсутствии акустических волн. С гидродинамической точки зрения образование такого слоя у поверхности биологического объекта эквивалентно увеличению его объема. В этом случае следует ожидать, что крио – консервирующая среда с биологическими объектами будет иметь различающиеся гидродинамические параметры до воздействия на нее акустических волн и после такого воздействия.

#### **Цель статьи**

Определить эффективный коэффициент вязкости среды образованной крио – консервирующей средой и биологическими объектами эмбрион или спермий.

#### **Основные материалы исследования**

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 крио – консервирующей 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 как показано в разделе 2 полностью определяется возбуждающей акустической волной. В этом случае можно воспользоваться результатами приведенными в [10] и получить следующее выражение для эффективного коэффициента вязкости жидкости, образованной крио – консервирующей средой и биологическими объектами

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

где  $\eta$  - коэффициент вязкости крио – консервирующей 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 (1) примет вид

$$\bar{\eta} = \eta (1 + \beta). \quad (2)$$

Из (2) следует, что эффективный коэффициент вязкости больше, чем коэффициент вязкости крио – консервирующей среды без биологических объектов в  $\beta$  раз.

Рассмотрим вначале случай крио – консервирующей среды с эмбрионами, которые моделируются геометрическими телами в виде шара с радиусом  $R$ . Пусть  $N_\varepsilon$  - число эмбрионов находящихся в крио – консервирующей среде. Будем полагать, что крио – консервирующая 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

$$\beta_\varepsilon = \frac{4 N_\varepsilon R^3}{3 R_0^2 h}. \quad (3)$$

Из (2) получаем выражение для эффективного коэффициента вязкости жидкости образованной крио – консервирующей среды и эмбрионами

$$\eta_\varepsilon = \eta \left( 1 + \frac{4 N_\varepsilon R^3}{3 R_0^2 h} \right). \quad (4)$$

Пусть теперь на крио – консервирующую среду с эмбрионами воздействует акустическая волна вида ( 1.13 ). Как уже было отмечено выше, в окрестности биологических объектов (эмбрионов), вследствие возникновения микропотоков, образуется пограничный слой частиц крио – консервирующей среды определенной толщины  $\delta$ .

$$\delta \cong R \sqrt{\frac{2\eta}{A}}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива с точностью до членов порядка  $(\alpha R)^2$ .

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

$$V_{\varepsilon 1} = \frac{4 N_\varepsilon \pi (R + \delta)^3}{3}. \quad (6)$$

Следовательно, коэффициент объемной концентрации эмбрионов так же изменяется

$$\bar{\beta}_э = \frac{4 N_э \pi (R + \delta)^3}{3 \pi R_0^2 h} = \frac{4 N_э R^3 \left(1 + 3 \sqrt{\frac{2\eta}{A}}\right)}{3 R_0^2 h}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (2) получим выражение для эффективного коэффициента вязкости крио – консервирующей среды с эмбрионами, на которую воздействует акустическая волна

$$\bar{\eta}_э = \eta \left[ 1 + \frac{4 N_э \left(1 + 3 \sqrt{\frac{2\eta}{A}}\right) R^3}{3 R_0^2 h} \right]. \quad (8)$$

Сравнивая (5) и (8) легко видеть, что

$$\bar{\eta}_э - \eta_э = \eta \frac{4 N_э \sqrt{\frac{2\eta}{A}} R^3}{R_0^2 h} = \eta \beta_э \sqrt{\frac{2\eta}{A}}. \quad (9)$$

Итак из (9) следует, что при воздействии акустической волны на крио – консервирующую среду с эмбрионами эффективный коэффициент вязкости увеличивается.

Теперь рассмотрим случай крио – консервирующей среды со спермиями.. Будем предполагать, что крио – консервирующая среда со спермиями заполняет кювету в виде кругового цилиндра с высотой  $h$  и радиусом  $R_0$ . В этой кювете находится  $N_c$  - спермиев.

Рассчитаем толщину пограничного слоя в окрестности поверхности спермия, возникающего в результате воздействия акустической волны.

$$\delta = \sqrt{\frac{\eta L}{\rho_0 \bar{V}_c}}, \quad (10)$$

где в качестве характерного линейного размера спермия выбрана величина  $L = 2a$  - длина большой оси эллипсоидального сфероида.

Скорость  $\bar{V}_c$  микропотока у поверхности спермия, как следует из результатов полученных в подразделе 2.3, имеет вид

$$\bar{V}_c = \frac{A B e^{-\alpha c \xi_0}}{2 c^2 \rho_0 \xi_0^2} (1 + \alpha c \xi_0). \quad (11)$$

Здесь  $A$  - амплитуда акустической волны,  $\alpha$  - коэффициент, а геометрические параметры  $B, c, \xi_0$  определяются следующим образом

$$B = \frac{2a}{2 + \frac{a}{c} \ln \frac{b}{a+c}}, \quad (12)$$

$$c = \sqrt{a^2 - b^2}, \quad \xi_0 = a/c.$$

Подставляя (12) в (11) после ряда преобразований получаем

$$\bar{V}_c = \frac{A e^{-\alpha a}}{\rho_0 a \left(2 + \frac{a}{c} \ln \frac{b}{a+c}\right)} (1 + \alpha a) \quad (13)$$

Так как геометрические размеры спермия малы, то должно выполняться неравенство  $\alpha a \ll 1$ . Тогда из (13) с точностью до членов порядка  $(\alpha a)^2$  имеем

$$\bar{V}_c = \frac{A}{\rho_0 a F}, \quad (14)$$

где  $F = 2 + \frac{a}{c} \ln \frac{b}{a+c}$ .

Воспользовавшись (14), из (10) получаем выражение для толщины пограничного слоя спермия

$$\delta = a \sqrt{\frac{2 F \eta}{A}}. \quad (15)$$

Рассчитаем эффективный коэффициент вязкости крио – консервирующей среды со спермиями при воздействии акустической волны. Для этого достаточно определить коэффициент объемной концентрации спермий. Имеем

$$\bar{\beta}_c = \frac{4 N_c [a b^2 + \delta (b^2 + 2 a b)]}{3 R_0^2 h}. \quad (16)$$

Формула справедлива с точностью до членов порядка  $\delta^2$ . Далее, согласно (2) получаем для эффективного коэффициента вязкости  $\bar{\eta}_c$  представление

$$\bar{\eta}_c = \eta \left( 1 + \frac{4 N_c [a b^2 + \delta (b^2 + 2 a b)]}{3 R_0^2 h} \right) \quad (17)$$

$$\bar{\eta}_c - \eta_c = \eta \frac{4 N_c a b (b + 2 a)}{3 R_0^2 h} \sqrt{\frac{2 F \eta}{A}} = \eta \beta_c \left( 1 + \frac{2 a}{b} \right) \sqrt{\frac{2 F \eta}{A}}. \quad (18)$$

Из (18) следует, что как и в случае крио – консервирующей среды с эмбрионами, воздействие акустической волны приводит к увеличению эффективного коэффициента вязкости крио – консервирующей среды со спермиями.

Рассмотрим теперь, как изменяется толщина пограничного слоя крио – консервирующей среды у поверхности биологического объекта в зависимости от среднего значения скорости микропотока.

$$\delta_\varepsilon = \sqrt{\frac{\eta 2 R}{\rho_0 \bar{V}_\varepsilon}}, \quad \delta_c = \sqrt{\frac{\eta 2 a}{\rho_0 \bar{V}_c}}, \quad (19)$$

где  $\delta_\varepsilon$  и  $\delta_c$  - соответственно толщина погранслоя для эмбриона и для спермия,  $\eta$  - динамическая вязкость, а  $\rho_0$  - плотность крио – консервирующей среды,  $\bar{V}_\varepsilon$  и  $\bar{V}_c$  - соответственно, средние скорости микропотоков для эмбриона и спермия.

Как следует из (19) толщины погранслоев монотонно убывают с ростом скорости микропотока.

В разделе 2 было установлено, что при изменении мощности звуковой волны  $P$  в пределах от 1 мквт до 5 мквт и частоты  $f = 10 \div 50$  кГц скорости микропотоков могут применяться в следующих пределах :

для эмбриона

$$0.3 \frac{\text{М}}{\text{с}} \leq \bar{V}_э \leq 3.3 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

для спермия

$$48.8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \leq \bar{V}_c \leq 546 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

Как следует из формулы (19), толщины погранслоев быстро убывают с увеличением скоростей микропотоков. Так в случае биологического объекта типа спермий при скорости микропотока  $\bar{V}_c = 546 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  толщина погранслоя

составляет  $\delta_c = 55 \text{ \AA}$ , а в случае эмбриона при максимально возможной скорости микропотока  $\bar{V}_э = 3.3 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  толщина погранслоя  $\delta_э = 0,19 \text{ мкм}$ .

Анализ проведенных расчетов показал, что максимально возможные толщины погранслоев реализуются при скоростях микропотоков, соответственно, для

спермия  $\bar{V}_c = 48.8 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  и для эмбриона  $\bar{V}_э = 0.3 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ . Эти скорости

микропотоков достигаются при следующих значениях мощности и частоты возбуждающей акустической волны  $P = 1 \text{ мкВт}$  и  $f = 50 \text{ кГц}$ . Толщины погранслоев составляют : для эмбриона  $\delta_э = 0,62 \text{ мкм}$  и  $\delta_c = 184 \text{ \AA}$ .

### **Выводы**

Разработан алгоритм расчета эффективного коэффициента вязкости среды, образованной биологическими объектами и крио – консервирующей средой. Показано, что эффективный коэффициент вязкости смеси крио – консервирующей среды и биологических объектов ( эмбрион, спермий ) при воздействии акустической волны увеличивается по сравнению с эффективным коэффициентом вязкости при отсутствии акустической волны.

**Список литературы:** 1. Кунденко Н.П. Теоретический анализ микропотоков при наличии акустических колебаний / Н.П. Кунденко // Вісник НТУ "ХПИ" .- Харьков, №58,2011. С.158-161. 2. Кунденко Н.П Математическое моделирование процесса воздействия акустического поля на криоконсервирующую среду с биологическим объектом / Н.П. Кунденко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенко .- Вип 117. – Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: 2011. С 140-142. 3. Акоюн Б.В., Ершов Ю.А. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами: Ультразвук в медицине, ветеринарии и экспериментальной биологии / Б.В Акоюн., Ю.А. Ершов -М.: Изд. МГТУ им Н.Э.Баумана, 2005, 224 с.

*Поступила в редколлегию 23.01.2012*