

## ДИФФУЗИЯ КРИОПРОТЕКТОРА ЧЕРЕЗ МЕМБРАНУ РЕПРОДУКТИВНЫХ КЛЕТОК

<sup>1</sup>Матросов А.А., <sup>1</sup>Нижник Д.А., <sup>1</sup>Соловьев А.Н.

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе с целью разработки новой технологии низкотемпературного консервирования репродуктивных клеток рыб, и в частности осетровых рыб, выполнено математическое моделирование акустического воздействия на биологические объекты. Строится математическая модель диффузии криопротектора через мембрану репродуктивной клетки. При этом считается, что специальным пьезоактуатором создается акустическое поле в криопротекторе. В силу этого соответствующее поле скоростей окружающей среды принимается заданным. Полученная краевая задача решается численно методом конечных элементов.

**Ключевые слова.** Диффузия, криопротектор, пьезоактуатор, репродуктивная клетка, осетровые рыбы.

## DIFFUSION OF A CRYOPROTECTANT THROUGH THE MEMBRANE OF REPRODUCTIVE CELLS

<sup>1</sup>Matrosov A.A., <sup>1</sup>Nizhnik D.A., <sup>1</sup>Soloviev A.N.

<sup>1</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract.** In order to develop a new technology for low-temperature preservation of fish reproductive cells, and sturgeon fish in particular, mathematical modeling of acoustic impact on biological objects has been performed. A mathematical model of cryoprotectant diffusion through the reproductive cell membrane is constructed. It is assumed that a special piezoactuator creates an acoustic field in the cryoprotectant. By virtue of this, the corresponding velocity field of the environment is assumed to be set. The resulting boundary value problem is solved numerically using the finite element method.

**Keywords.** Diffusion, cryoprotectant, piezoactuator, reproductive cell, sturgeon fish.

**Введение.** В настоящее время важной задачей является разработка новых технологий низкотемпературного консервирования репродуктивных клеток рыб. Такая технология несомненно будет эффективна не только при искусственном воспроизводстве, но и позволит обеспечить создание криобанков с целью сохранения генетического разнообразия ценных видов рыб.

Однако, основная проблема криоконсервирования заключается в необходимости предохранения клеток от повреждения при замораживании спермы. Основным способом предохранения репродуктивных клеток от повреждения является помещение спермы в криопротектор, призванный защитить клетку на этапе эквilibрации.

В связи с этим в работе выполнено математическое моделирование акустического воздействия на биологические объекты.

Акустическое воздействие на репродуктивные клетки сводится к двум основным этапам.

На первом этапе при криоконсервации специальным пьезоактуатором создается акустическое поле в криопротекторе, содержащем репродуктивные клетки.

Математическая модель такого воздействия строится в рамках механики сплошной среды. Для этого использованы уравнения механики деформируемого твердого тела в осесимметричной постановке (теории упругости и электроупругости) и уравнения движения жидких и газообразных сред (в акустическом приближении) [1-3]. Такая модель представляет собой начально-краевую задачу и в общем случае её решение может быть построено только численно с использованием соответствующих программных комплексов конечно-элементного анализа.

В результате проведенного численного анализа [4, 5] найдено соответствующее поле скоростей окружающей среды. Показано, что в объеме суспензии эффективно возбуждается акустическое поле на первой изгибной моде. Однако, это поле не является однородным, о чем свидетельствует распределение скоростей. Поэтому в процессе акустического воздействия имеет смысл использовать перемешивание раствора. В то же время наличие участков с интенсивной положительной и отрицательной составляющей вертикальной скорости, возможно, автоматически должно привести к процессу перемешивания.

На втором этапе рассматривается диффузия криопротектора через мембрану клетки. Данный процесс в общем виде описывается системой дифференциальных уравнений, основанных на законах Фика и уравнением состояния среды.

Учитывая современное разнообразие моделей внутриклеточного переноса веществ, в рамках рассматриваемой в данной работе механической модели примем, что соответствующие коэффициенты диффузии предварительно определены из соответствующих биологических экспериментов.

Для проведения численного эксперимента использовалась программа сценарных моделей решения дифференциальных уравнений методом конечных элементов FlexPDE.

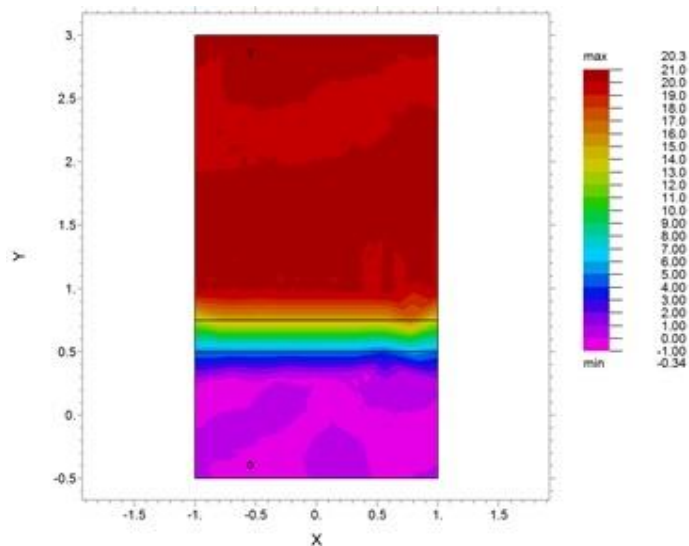


Рисунок 1 – Распределение  $c_1$

На рис. 1 показано полученное распределение концентрации биологической внутриклеточной жидкости  $c_1$ . Видно, что она находится внутри клетки и не выходит наружу через мембрану. На этом рисунке красным цветом показан криопротектор, зеленым – мембрана клетки, синим – внутриклеточная биологическая жидкость.

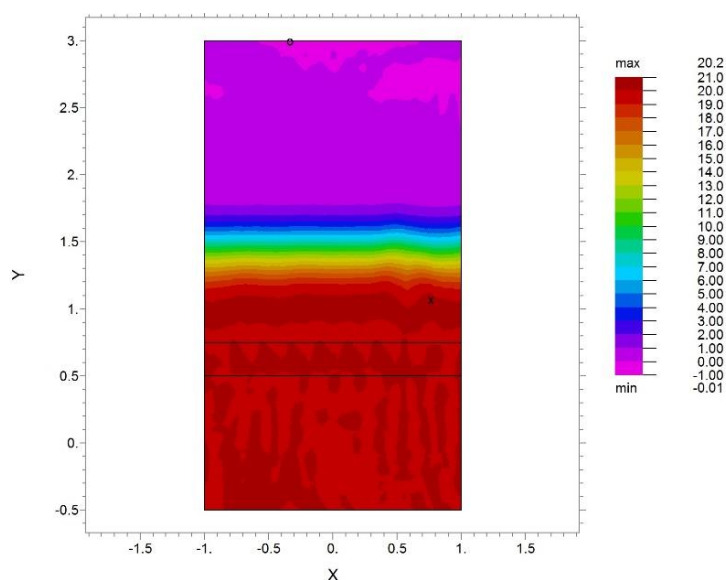


Рисунок 2 – Распределение  $c_2$

На рисунке 2 показано распределение концентрации криопротектора  $c_2$ , находившегося до начала эксперимента вне клетки. Видно, что теперь в результате диффузии криопротектор интенсивно проникает внутрь клетки.

В результате проведенных численных экспериментов установлено, что диффузия криопротектора внутрь клетки зависит от амплитуды скорости и времени воздействия, но слабо зависит от частоты колебаний. Таким образом, для эффективной защиты репродуктивных клеток криопротектором на суспензию следует воздействовать пьезоактуатором вблизи резонансной частоты.

#### **Список использованных источников**

1. Matrosov Andrey, Nizhnik Daria, Soloviev Arkady. Simulation of Impact of Acoustic Field Produced by Piezoactuator on Biological Fluid with Cryoprotector // International Conference «Mathematical Modeling, Inverse Problems and Big Data». – Yakutsk: North-Eastern Federal University, 2021. – Pp. 21.
2. Matrosov A.A., Nizhnik D.A., Ponomareva E.N., Soloviev A.N., Chebanenko V.A. Modeling of Impact of Acoustic Field on Biological Fluid with Cryoprotector // Modern Problems in Modeling Materials for Mechanical, Medical, and Biological Applications (MPMM&A-2021). – Rostov-on-Don: DSTU, 2021. – Pp. 9.
3. A.A. Matrosov, D.A. Nizhnik, A.N. Soloviev. Effects of Piezoactuator on Fish Reproductive Cells during the Equilibrium Stage // 10th Anniversary International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2021–2022). – Rostov-on-Don: Southern Federal University Press, 2022. – Pp. 198-199.
4. Пономарева Е.Н., Соловьев А.Н., Матросов А.А., Чебаненко В.А., Нижник Д.А., Егорова А.А., Красильникова А.А. Математическое моделирование акустического поля для воздействия на репродуктивные клетки рыб в криозащитном растворе при эквilibрации // Биофизика, № 4 (67), 2022. – С. 1-13.
5. Матросов А.А., Нижник Д.А., Мальцева Т.А. Влияние пьезоактуатора на репродуктивные клетки рыб // Математическое моделирование и биомеханика в современном университете (ММБМ 2022). – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2022. – С. 63.

Работа поддержана Грантом РФФ 21-16-00118 «Исследование применения пьезоактуаторов в технологии низкотемпературного консервирования репродуктивных клеток рыб с интеллектуальным управлением процесса замораживания».