

Список литературы:

1. Назаренко Г.И., Хитрова А.Н. Ультразвуковая диагностика предстательной железы в современной практике. – М.: Издательский дом «Видар», 2012. 288 с.
2. Лаврова С.А., Ткаченко П.М. Ультразвуковая диагностика заболеваний предстательной железы // Новости лучевой диагностики. 1999. № 1. С. 11-14.
3. Бурмака А.А., Говорухина Т.Н., Разумова К.В. Системная модель распознавания и идентификации состояния предстательной железы по ее изображениям УЗИ и ТРУЗИ // Научные технологии. 2014. № 12. Т. 15. С. 13-20.
4. Аль-Шукри С.Х., Ткачук В.Н. Урология. Учебник / Под ред. С.Х. Аль-Шукри. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 480 с.
5. Бурмака А.А., Разумова К.В. Аналитические модели цифрового преобразования визуальной информации статичных изображений результатов ультразвуковых и рентгеновских исследований в медицине // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычис-

лительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2014. № 3. С. 80-85.

Александр Александрович Бурмака,
д-р техн. наук, профессор,
Ксения Викторовна Разумова,
аспирант,
кафедра биомедицинской инженерии,
Наталья Анатольевна Милостная,
канд. техн. наук, начальник управления
подготовки и аттестации кадров
высшей квалификации,
Роман Анатольевич Крупчатников,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра биомедицинской инженерии,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск,
e-mail: myelectronworld@mail.ru

А.Г. Гудков, А.Ф. Бобрихин, М.С. Зеленов, В.Ю. Леушин, В.Н. Лемонджава,
И.Н. Маржановский, А.В. Чернышев

Моделирование процессов хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред в полимерных контейнерах

Аннотация

Разработана математическая модель физического процесса хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред, размещенных внутри полимерных контейнеров, представленного в виде термогидродинамической системы. Предложена методика расчета переходных процессов стабилизации температуры тромбоцитного концентрата. Приведены результаты расчетов характерных режимов хранения, различающихся начальными условиями процесса.

Введение

В соответствии с «Руководством по приготовлению, использованию и обеспечению качества компонентов крови» тромбоциты следует хранить в таких условиях, при которых будут сохранены жизнеспособность и гемостатическая активность клеток. Если тромбоциты предстоит хранить более 24 ч, то для приготовления используют замкнутую систему полимерных контейнеров. Полимерные контейнеры должны обладать хорошей газопроницаемостью, чтобы обеспечить к тромбоцитам приток кислорода. Потребность в кислороде зависит от содержания в концентрате тромбоцитов и лейкоцитов. Оптимальная температура хранения составляет от 20 до 24 °С. Необходимым условием сохранения жизнеспособности тромбоцитов является их постоянное перемешивание. Оно должно быть достаточно эффективным, чтобы обеспечить доступ кислорода в течение всего времени хранения, которое при оптимальных условиях может составить 7 дней. Результаты ранее проведенных работ по созданию устройств для хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред приведены в [1]-[3]. Для оптимизации конструкции этих устройств в рамках описываемой работы был проведен комплекс термогидродинамических расчетов с использованием технологий компьютерного моделирования. Цель компьютерного моделирования – определение длительности переходного процесса стабилизации температуры тромбоцитосодержащей трансфузионной среды, находящейся внутри полимерного контейнера.

Математическая модель физических процессов безопасного хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред

В качестве объекта исследования был выбран широко применяемый в лечебных учреждениях полимерный контейнер для хранения тромбоцитного концентрата (ТК), выпускаемый компанией «MasoPharma» (Франция).

В результате проведенного трехмерного сканирования контейнера, заполненного ТК, получено численное описание по-

верхностной геометрии, которое затем было подвергнуто компьютерной обработке для получения твердотельной трехмерной модели жидкостного объема. Трехмерное сканирование было выполнено с помощью прибора «Breuckmannstereo SCAN 5MP». Последующая обработка полученных данных была выполнена в среде ANSYS Workbench. Затем была составлена расчетная схема объекта исследования (рис. 1), включающая в себя следующие элементы: объем жидкости (Ω_1), оболочку контейнера (Ω_2), полку устройства для хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред (Ω_3), воздушный объем вокруг контейнера и полки (Ω_4).

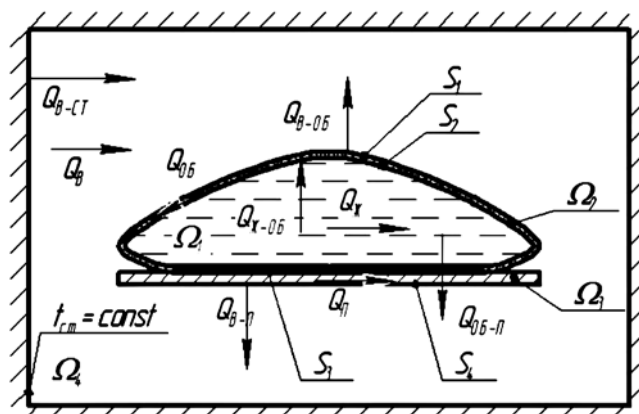


Рис. 1. Расчетная схема полимерного контейнера с тромбоцитосодержащей трансфузионной средой

На расчетной схеме определены поверхности раздела элементов: S1 – поверхность контакта оболочки контейнера с окружающим воздухом; S2 – поверхность раздела оболочки с жидкостью; S3 – поверхность контакта оболочки контейнера с полкой; S4 – поверхность раздела полки с окружающим воз-

духом. В качестве граничного условия принято, что температура внешней границы воздушного объема постоянна и равна начальной температуре воздушного объема.

В соответствии с данной схемой при хранении в рассматриваемом объеме происходят следующие процессы: теплообмен внутри объема жидкости ($Q_{ж}$); теплообмен по воздушному объему ($Q_{в}$); контактный теплообмен теплопроводностью по оболочке полимерного контейнера ($Q_{об}$); теплообмен теплопроводностью по полке ($Q_{п}$); контактный теплообмен между оболочкой и полкой ($Q_{об-п}$); конвективный теплообмен между жидкостью и оболочкой полимерного контейнера ($Q_{ж-об}$); конвективный теплообмен между оболочкой и окружающим воздухом ($Q_{в-об}$); конвективный теплообмен между полкой и окружающим воздухом ($Q_{в-п}$); конвективный теплообмен между воздухом и изотермической внешней границей ($Q_{в-ст}$).

В соответствии с представленной расчетной схемой составлена математическая модель физических процессов, протекающих при хранении ТК. Для корректной постановки задачи расчета термогидродинамической системы был введен ряд допущений: движение жидкости и воздуха считается ламинарным; жидкость и воздух считаются ньютоновскими и несжимаемыми средами в силу малых скоростей движения; все рассматриваемые материалы однородны по составу и изотропны по теплофизическим свойствам; физические параметры жидкой среды (ТК) и газообразной среды (воздуха), а также твердых тел считаются независимыми от температуры; так как плотность жидких сред меняется в незначительных пределах, то используется приближение Буссинеска, в соответствии с которым плотности жидкости и воздуха являются линейными функциями температуры и определяются как $\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)]$, где ρ – плотность жидкой среды; T – температура; ρ – коэффициент объемного расширения жидкой среды; $\rho_0 = \rho(T_0)$ – характерное значение плотности при температуре T_0 ; тепловое излучение не рассматривается.

Описание процессов движения и теплообмена основано на системе дифференциальных уравнений в частных производных. Конвективный теплообмен между элементами системы и окружающим воздухом описывается зависимостями, включающими в себя уравнения сохранения количества движения, уравнение сохранения энергии и уравнение сохранения массы.

Уравнения сохранения количества движения для жидкой среды:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i u) + \text{div}(\rho_i \vec{u}u) = \text{div}(\mu_i \text{grad}u) - \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i v) + \text{div}(\rho_i \vec{v}v) = \text{div}(\mu_i \text{grad}v) - \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i w) + \text{div}(\rho_i \vec{w}w) = \text{div}(\mu_i \text{grad}w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_i g. \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы для жидкой среды:

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (4)$$

Уравнение сохранения энергии для жидкой среды:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i c_i T) + \text{div}(\rho_i c_i \vec{v}T) = \text{div}(\lambda_i \text{grad}T). \quad (5)$$

В данных уравнениях приняты следующие обозначения: t – время; x, y, z – координаты положения; u, v, w – скорость в различных проекциях; $\vec{v}$ – вектор скорости; μ – динамическая вязкость; g – ускорение свободного падения; c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности жидкой среды. Зависимости рассматриваются с учетом приближения Буссинеска: плотности жидких сред принимаются всюду постоянными за исключением члена, описывающего выталкивающую силу, где плотность принимается линейной функцией температуры.

В общем случае полученная система уравнений (1)–(5) не имеет аналитического решения. Для получения приближенного решения были использованы методы численного решения, включающие в себя этап дискретизации на основе метода контрольных объемов (МКО) и специально разработанного итерационного алгоритма. Для численного моделирования методом МКО было проведено разбиение твердотельной модели на сетку конечных объемов. Перед каждым расчетом были определены температуры жидкости в пакете, оболочки, полки и воздуха, характерные для режима.

Результаты

На рис. 2 представлены характерные распределения температур в расчетной области. На рис. 3 и 4 показаны результаты расчетов временных зависимостей температуры ТК в полимерном контейнере при выходе устройства для хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред в режим стабилизации температуры при различных начальных температурах тромбоцитосодержащей трансфузионной среды.

В результате проведенных расчетов было определено, что в зависимости от начальных условий длительность термоста-

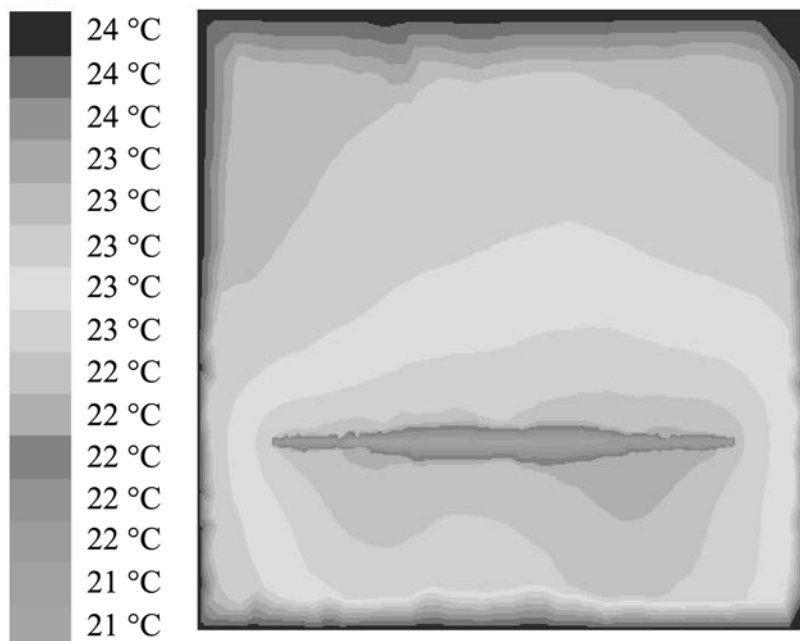


Рис. 2. Температурное поле в расчетной области на момент времени $t = 100$ с

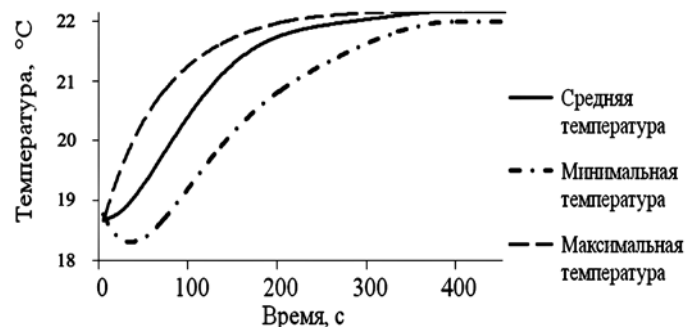


Рис. 3. График переходного процесса по объему в расчетной области. Время переходного процесса составляет 340 с

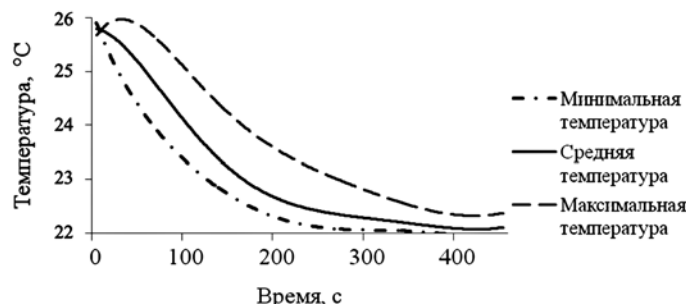


Рис. 4. График переходного процесса по объему в расчетной области. Время переходного процесса составляет 350 с

билизации составляла от 3,7 до 5,8 мин (от 220 до 350 с), что позволяет судить о достаточно быстром выходе на режим термостабилизации, обеспечивающем высокое качество и безопасность хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред в заданных условиях.

Результаты проведенных исследований были использованы при создании экспериментального образца устройства для безопасного хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред, которое обеспечивает требования ВОЗ к режимам хранения ТК, а также дистанционный контроль и протоколирование режимов хранения ТК с помощью персонального компьютера (соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0138, уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок RFMEFI57714X0138).

Заключение

В рамках реализации проекта проведены исследования физических процессов безопасного хранения биологических объектов в условиях их термостатирования при высоких требованиях к точности поддержания температуры и равномерности температуры по объему в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$, выполнено моделирование теплофизических процессов в полимерных контейнерах с ТК. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, так же как и разработка новых математических моделей теплофизических процессов, позволят создать научно-методическую базу для разработки методики оптимизации конструкции устройства для безопасного хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред.

Список литературы:

1. Бобрехин А.Ф., Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Лемонджав В.Н., Петров В.И., Щукин С.И. Оборудование для тепловой обработки и хранения компонентов и препаратов крови // Медицинская техника. 2015. № 2. С. 40-43.
2. Bobrikhin A.F., Gudkov A.G., Leushin V. Yu., Lemondzhava V.N., Petrov V.I., Schukin S.I. Equipment for Thermal Treatment and Storage of Blood Preparations and Components // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49. № 2. PP. 40-43.

3. Леушин В.Ю., Бобрехин А.Ф., Лемонджав В.Н., Горлачева Е.Н., Маржановский И.Н., Борозинец А.С. Устройство для безопасного хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред с использованием информационных и РЧИД-технологий / 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015). Севастополь, 6-12 сентября 2015 г. Материалы конф. в 2-х т. Т. 2.

Александр Григорьевич Гудков,
д-р техн. наук, профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Александр Федорович Бобрехин,
начальник отдела,
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,
Михаил Сергеевич Зеленев,
аспирант,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Виталий Юрьевич Леушин,
канд. техн. наук,
зам. генерального директора,
Вахтанг Нодарович Лемонджав,
начальник отдела,
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,
Иван Николаевич Маржановский,
лаборант,
Андрей Владимирович Чернышев,
д-р техн. наук, профессор,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail ooo.giperion@gmail.com