

Моделирование процессов хранения контейнеров с тромбоцитосодержащими средами в инкубаторах тромбоцитов

Аннотация

Проведено тепловое проектирование устройства безопасного хранения биологических объектов. Построены трехмерные модели устройства безопасного хранения с учетом многослойности стенок. Проведены вычислительные эксперименты с последующим анализом распределения температур по расчетной области, а также графиков изменения параметров с течением времени.

Объектом исследования является устройство для безопасного хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред, загруженное 24 пластиковыми контейнерами, заполненными тромбоцитосодержащей трансфузионной жидкостью. Контейнеры расположены на поддонах электромеханического модуля, не касаясь друг друга, по четыре пакета на одном поддоне.

Электромеханический модуль размещается внутри полости камеры устройства таким образом, чтобы обеспечить свободный доступ охлаждающего воздуха со всех боковых сторон. Модуль приводится в действие электродвигателем, соединенным через редуктор и эксцентриковую передачу с подвижной платформой. По предварительным оценкам, мощность тепловых потерь при работе данной системы составляет 6 Вт.

Само устройство выполнено в виде металлического шкафа, в котором размещаются теплоизолированная камера из нержавеющей стали, а также система вентиляции, система регулирования температуры, система сигнализации и регистрации параметров. На передней стороне устройства расположена герметично закрывающаяся дверь с прозрачным стеклопакетом, позволяющим контролировать работу электромеханического модуля, а также отслеживать количество контейнеров с тромбоцитосодержащей трансфузионной жидкостью без открытия двери и нарушения теплового режима.

Для обеспечения заданного температурного режима в задней стенке камеры установлены две термобатареи на базе термоэлектрических модулей (элементов Пельтье), разработанные в рамках данной ПНИЭР.

В качестве контейнеров для хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных жидкостей в ЛПУ широко применяются специальные пакеты – продукция компании «MасoPharma» (Франция). Пакет выполнен из мягкого полипропилена. В рамках выполняемого исследования объем заполнения контейнера принят равным 0,35 л [1].

Для корректной постановки задачи расчета термогидродинамической системы был введен ряд допущений: движение жидкости 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 (исключая плотность) жидких сред – тромбоцитосодержащей трансфузионной жидкости и 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; β – коэффициент объемного расширения жидкой среды; $\rho_0 = \rho(T_0)$ – характерное значение плотности при температуре T_0 ; все поверхности считаются оптически серыми, а жидкие среды – оптически прозрачными; обратное отражение от внешней границы стеклопакета отсутствует; многослойные стенки камеры рассматриваются как однослойные той же тол-

щины с соответствующим пересчетом коэффициентов теплопроводности; влияние перфорации в поддонах на процессы теплообмена не учитывается; влияние полимерной оболочки контейнеров для хранения тромбоцитосодержащей трансфузионной жидкости на процессы теплопроводности не учитывается; оптические параметры поверхностей постоянны; тепловое контактное сопротивление отсутствует.

Описание процессов движения и теплообмена жидкой среды и теплопередачи в омываемых данной жидкой средой твердых телах основано на системе дифференциальных уравнений в частных производных. При составлении математической модели расчетная область с позиции протекающих в ее элементах процессов делится на три основных блока: рабочее тело, жидкость в контейнерах, твердые тела.

Конвективный теплообмен между элементами системы и окружающим воздухом описывается зависимостями, включающими в себя уравнения сохранения количества движения, уравнение сохранения энергии и уравнение сохранения массы [2]. 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.

Уравнения сохранения количества движения для жидкой среды:

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

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

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

Уравнение сохранения массы для жидкой среды:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0.$$

Уравнение сохранения энергии для жидкой среды:

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

Тепловой поток в процессе конвекции определялся по формуле

$$Q_K = \alpha \cdot S \cdot (T_{\Pi} - T_{\text{Ж}}),$$

где α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности теплоотдачи; индексы «П» и «Ж» соответствуют поверхности и жидкости.

Коэффициент теплоотдачи α определяется через безразмерный коэффициент теплоотдачи – критерий Нуссельта Nu :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d},$$

где d – характерный определяющий размер системы.

Расчетные зависимости для числа Нуссельта построены на основе обобщения экспериментальных данных, полученных для различных случаев обтекания жидкостью твердых тел.

Тепловые процессы, протекающие в твердых телах, описываются уравнением теплопроводности, представляющим собой уравнение сохранения энергии. Уравнение теплопроводности для твердого тела получается из уравнения энергии для жидкой среды при условии отсутствия движения ($\vec{v} = 0$).

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \cdot c_i \cdot T) = \text{div} (\lambda_i \cdot \text{grad} T).$$

Для учета теплопередачи излучением в математическую модель тепловых процессов включена радиационная модель (surface-to-surface), благодаря которой рассчитывается лучистый теплообмен между сегментами поверхностей, являющихся границами отдельных областей.

Расчет суммарной плотности радиационного потока на поверхностях выполняется матричным методом, подробно описанным в [2]–[4].

В качестве граничных условий принято:

- условие постоянной температуры на внешней границе камеры устройства $T_{\text{СТ}} = T_{\text{ОКР_СР}}$, равной температуре окружающего воздуха (задается параметрами режима);
- на входной и выходной гранях вентилятора скорость потока воздуха ортогональна плоскости входа, постоянна по значению, т. е. $v_{\text{ВЕНТ}} = \text{const}$;
- на холодной стороне термоэлектрического модуля задан тепловой поток, равный холодопроизводительности термоэлектрического модуля;
- лучистый поток тепловой энергии от окна камеры равномерно распределен по поверхности окна. Интегральное значение теплового потока равно 5 Вт;
- тепловыделение от двигателя электромеханического модуля равномерно распределено по поверхности двигателя. Интегральное значение теплового потока равно 6 Вт;
- условие идеального контакта позволяет принять одинаковыми температуры в приграничных областях по обе стороны от поверхности раздела.

В качестве начальных условий принято:

- одинаковая температура всех объектов расчетной схемы, за исключением температуры контейнеров, равная температуре окружающего воздуха;

- температуры контейнеров равны температуре загрузки;
- давление в полости камеры распределено равномерно и равно атмосферному.

В общем случае полученная система уравнений не имеет аналитического решения. Для получения приближенного решения были использованы методы численного решения.

Для дискретизации исходных дифференциальных уравнений был использован метод конечных объемов (МКО).

Для получения решения системы дифференциальных уравнений был использован SIMPLE-подобный итерационный алгоритм. Аббревиатура SIMPLE происходит от английского термина Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (полунявный метод для связывающих давление уравнений).

Для проведения теплового проектирования была разработана упрощенная трехмерная модель устройства в соответствии с ранее разработанной конструкцией, представленная на рис. 1 [5].

В качестве граничного условия принято, что температура внешней границы камеры постоянна и равна характерной температуре для выбранного теплового режима.

Термобатарея представлена как трехслойная стенка, через средний слой которой проходит постоянный тепловой поток, равный холодопроизводительности термоэлектрического элемента. При этом максимальный перепад температур между холодной и горячей сторонами составляет 69 °С. Каждый из внутренних вентиляторов представлен в виде параллелепипеда, на одной грани которого задана скорость всасывания потока, а на противоположной – скорость нагнетания.

Каждый из контейнеров с тромбоцитосодержащей трансфузионной средой представлен как однородный параллелепипед, размещенный на плоской полке. Для каждой границы раздела жидкой и твердой фаз рассматривается процесс конвективного теплообмена. В каждом однородном объекте расчетной схемы рассматривается процесс теплообмена теплопроводностью. Между каждыми двумя сегментами поверхностей рассматривается наличие лучистого теплообмена, зависящего от температуры поверхностей. В случае затенения лучистый теплообмен между двумя сегментами не учитывается.

Для проведения расчетов необходимые свойства материалов были подобраны по стандартным базам материалов.

Изменение распределения температур по расчетной области представлено на рис. 2.

По рис. 2 можно видеть, что наиболее теплые массы воздуха концентрируются в верхней части устройства для безопасного хранения (тестовая точка 4), а наиболее холодные – в области около радиатора термоэлектрического модуля (тестовая точка 2). Однако на точку 2 оказывает влияние недоохлаждение стенки, что может привести к дополнительному подогреву датчика.

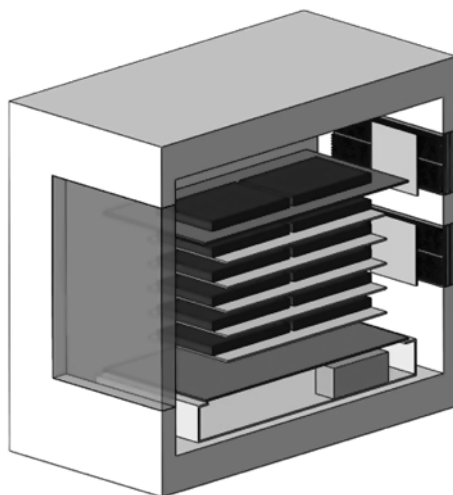


Рис. 1. Сечение трехмерной модели расчетной области устройства для хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред

Нагрев от двигателя электромеханического модуля не приводит к значительному перераспределению температур.

Выводы

В результате проведенной работы была разработана математическая модель термогазогидродинамических процессов, протекающих при термостатировании биологических объектов в устройствах для их хранения.

В целом разница температуры воздуха между различными зонами полости невелика, а потому контейнеры в полости должны равномерно термостатироваться независимо от положения на полках электромеханического модуля.

Проведено тепловое проектирование устройства в целом, которое показало, что конструкция устройства обеспечивает необходимые требования для хранения тромбоцитов (от + 20 до + 24 °C) [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.577.21.0138, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714XO138).

Список литературы:

1. Гудков А.Г., Бобрихин А.Ф., Зеленов М.С., Леушин В.Ю., Лемонджава В.Н., Маржановский И.Н., Чернышев А.В. Моделирование процессов хранения тромбоцитосодержащих трансфузионных сред в полимерных контейнерах // Медицинская техника. 2016. № 3. С. 53-55.
2. Крутиков А.А. Создание метода расчета и разработка пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения / Дис. канд. техн. наук: 05.04.06. – М., 2008. 128 с.
3. Kreith F., Black W.Z. Basic Heat Transfer. – Harper and Row, Publishers, New York, 1980.
4. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. 935 с.
5. Четчикин А.В., Данильченко В.В., Григорьян М.Ш., Макеев А.Б., Гудков А.Г., Щукин С.И. Обеспечение безопасности использования тромбоцитного концентрата в учреждениях службы крови // Медицинская техника. 2016. № 2. С. 1-3.

Александр Григорьевич Гудков,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра РЛБ «Технологии приборостроения»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Светлана Викторовна Агасиева,
канд. техн. наук, доцент,
Александр Федорович Бобрихин,
начальник отдела,
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,
Евгения Николаевна Горлачева,
канд. эконом. наук, доцент,
Михаил Сергеевич Зеленов,
ассистент,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Вахтанг Нодарович Лемонджава,
начальник отдела,
Виталий Юрьевич Леушин,
канд. техн. наук, зам. генерального директора,
ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН»,
Андрей Владимирович Чернышев,
д-р техн. наук, профессор,
Мартин Андреевич Левчук,
студент,
Сергей Владимирович Чижиков,
техник,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: mszelenov@gmail.com

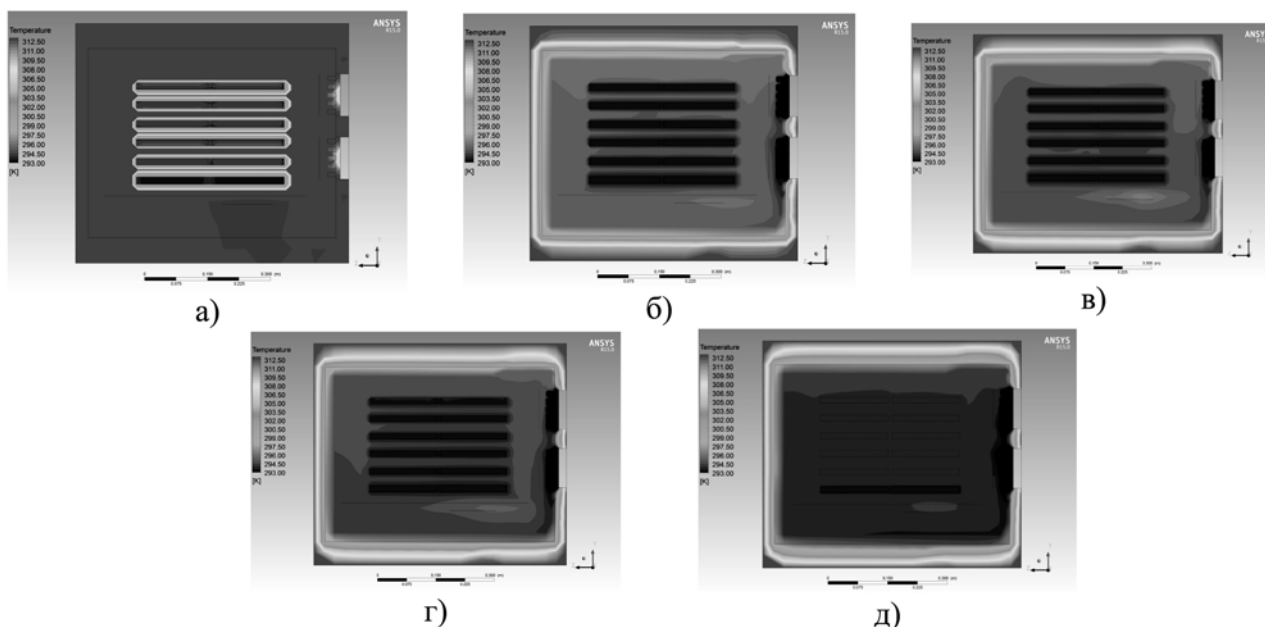


Рис. 2. Поля распределения температур в расчетной области: а) начало расчета; б) 1 мин; в) 10 мин; г) 15 мин; д) 60 мин