

УДК 519.63:62.65

Особенности моделирования обратных реакций в тепловой системе при контактном нагреве человека

Шульженко Александр Анатольевич (*)

aa_shulzhenko.01@mail.ru

SPIN-код: 6537-4340

Модестов Михаил Борисович

ecometer@mail.ru

ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе при описании тепловой системы использовались граничные условия III рода с переменным во времени коэффициентом теплоотдачи, возникающим при контактном нагреве человека нагревателем. Повышение точности решения обеспечивалось использованием теории возмущений. Данный материал представляет интерес для специалистов в области проектирования устройств с тепловыделением.

Ключевые слова: граничные условия III рода, нагрев, теплоотдача, контактный нагрев

Введение. При проведении моделирования тепловых процессов температурные изменения на границе тепловой системы производится по закону Ньютона — Рихмана

$$-\lambda \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -K (\Delta T - \Delta T_{cp}) \text{ при } t > 0 \text{ и } x < x_1,$$

где используется усредненный, постоянный коэффициент теплоотдачи тканевого электронагревателя среде, K . Однако при нагреве (охлаждении) пограничных сред коэффициент теплоотдачи часто бывает переменным и при использовании (1) результат имитационного моделирования температурных изменений в тепловой системе не соответствует полученным экспериментальным данным [1].

Материалы и методы; результаты. Аналогичный результат был получен при исследовании периферического кровообращения человека. При нагреве тела человека происходит расширение и/или сужение сосудистого русла, увеличение и/или снижение скорости переноса крови [2–4], что приводит, согласно пропорциональности коэффициента теплоотдачи конвективным процессам [5], к его изменениям во времени. Решение краевой задачи при переменном коэффициенте теплоотдачи с использованием (1) с погрешностью $O(h)$ не позволяет получить желаемый результат. Поэтому, применялась теория возмущений с использованием асимптотического разложения в ряд Тейлора и уравнения Фурье с внутренними источниками, что позволило получить решение, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными [1].

Закключение. Моделирование с использованием разложения в асимптотический ряд Тейлора и уравнения Фурье с внутренними источниками позволяет учесть температурные изменения в тепловой системе, отражающие контактный нагрев и реакцию тела человека (среды) на этот нагрев.

Такой подход делает возможным проводить аналогичные математические эксперименты и с объектами технического назначения, как с линейными, так и сильно нелинейными изменениями во времени коэффициентов теплоотдачи (например, при решении задач Стефана).

Имитационное моделирование показало, что возможность увидеть отклик нагреваемой среды (при нагреве человека это явление хорошо наблюдать по изменениям, связанным с аксонным перепадом температуры) сильно зависит от параметров используемых материалов, таких как масса, теплоемкость и т. д. Данная задача является многокритериальной и при решении требует оптимизации физических параметров всех элементов тепловой системы.

Список источников

- [1] Шульженко А.А. Особенности использования теории возмущений при описании граничных условий III рода на поверхности тканых электронагревателей. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2025, № 1, с. 49–56. https://doi.org/10.52261/02346206_2025_1_49
- [2] Vissler E.H. Human. Temperature. Control: A Quantitative Approach. Springer, 2018, 425 p.
- [3] Kellogg D.L. In vivo mechanisms of cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans during thermoregulatory challenges. *Journal of applied physiology*, 2006, vol. 100, no. 5, pp. 1709–1718.
- [4] Мизева И.А., Ветрова Д.В. Поведение пульсаций кожного кровотока при реальном нагреве поверхности кожи. *Российский журнал биомеханики*, 2014, т. 18, № 4, с. 513–521.
- [5] Кирпичев М.В., Михеев М.А., Эйгенсон Л.С. *Теплопередача*. Москва — Ленинград, Государственное энергетическое издательство, 1940, 292 с.

