

## **Численное моделирование конвекционного нагрева неоднородных материалов**

*Проведен трёхмерный расчет размораживания и разогрева неоднородного материала (мясного оковалка) в паровоздушной среде с изменяющейся температурой. Показана возможность усреднения физических характеристик мясного оковалка, при наличии множественных жировых включений.*

**Ключевые слова:** конвекционный нагрев, числовое моделирование, коэффициент теплоотдачи

Математическое моделирование процессов термической обработки неоднородных материалов позволит повысить качество термообработки, улучшить показатели технологических процессов и обоснованно проводить выбор температурного режима. Процессы конвекционного нагрева неоднородных материалов, как правило, описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений гидродинамики и уравнения нестационарной теплопроводности, решение которых затруднительно не только аналитическими, но и численными методами. Эти трудности связаны с тем, что

1. значения физических параметров материалов (плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и т.д.), входящих в уравнения, являются сложными функциями температуры, особенно в области фазового перехода,

2. в процессе нагрева возможны фазовые переходы первого и второго рода.

В качестве исследуемого объекта был взят мясной оковалок. Моделирование включало несколько этапов:

1. корректная аппроксимация экспериментально измеренных физических параметров материала функциями, зависящими от температуры,

2. ступенчатая аппроксимация температурного режима паровоздушной среды,

3. моделирование неоднородностей среды и их распределения по объему исследуемого объекта.

Для задания основных физических характеристик (теплоемкость, коэффициент теплопередачи и т.д.) материала использовались экспериментальные данные [1], приведенные на рис. 1 и 3. На рис. 2 и 4 представлены те же характеристики, аппроксимированные рациональными и ступенчатыми функциями температуры соответственно, причем интеграл от теплоемкости (кривые 1 и 2 на рис. 2) по температуре в интервале, соответствующем фазовому переходу, равен удельному коэффициенту плавления данного материала.

Кривая 1 (рис. 1 и рис. 3) соответствует обезжиренному мясу и имеет ярко выраженный скачок при температуре фазового перехода. Кривая 2 на рис. 1 и рис. 3 соответствует параметрам жировой ткани.

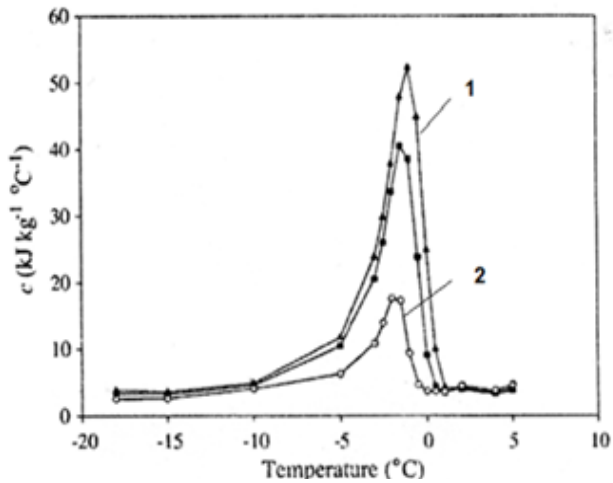


Рисунок 1. Экспериментально измеренные температурные зависимости теплоемкости мяса различной жирности

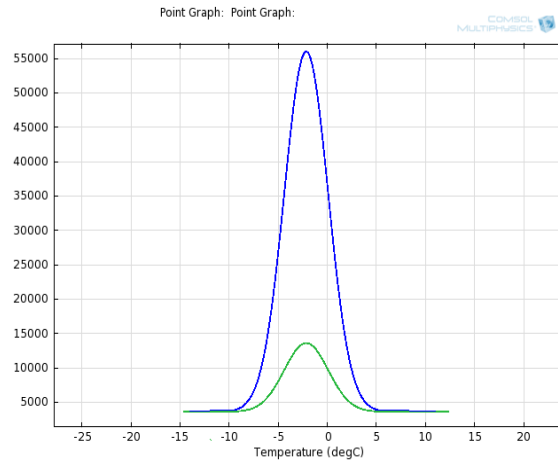


Рисунок 2. Аппроксимации температурных зависимостей теплоемкостей мяса различной жирности

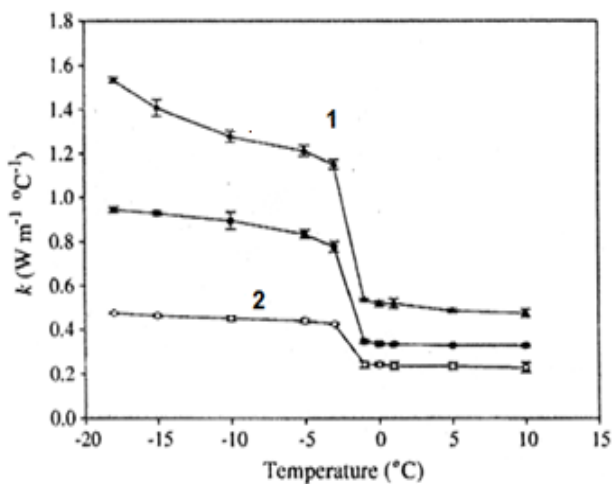


Рисунок 3. Экспериментально измеренные температурные зависимости коэффициента теплопередачи мяса различной жирности

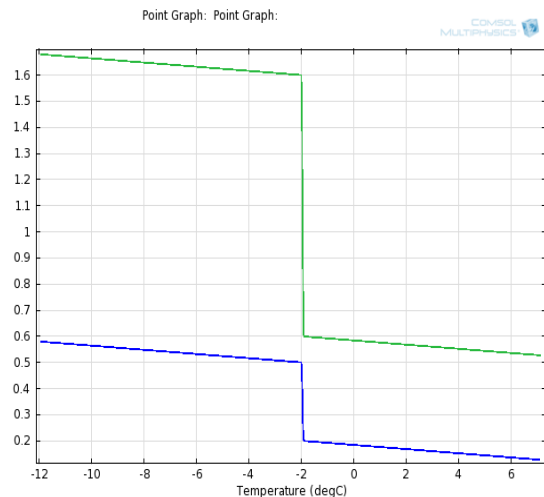


Рисунок 4. Аппроксимации температурных зависимостей коэффициентов теплопередачи мяса различной жирности

Теплообмен происходит между мясной тканью и паровоздушной средой. Данная задача является внешней, и для исключения уравнений гидродинамики (упрощения задачи), целесообразно перейти от внешней задачи к внутренней с помощью коэффициента теплоотдачи поверхности  $\alpha$ . По данным [2], коэффициент теплоотдачи поверхности находится в интервале 10 – 11, однако при этом не указаны конкретные условия его измерения.

Для получения более реалистичных результатов моделирования проведен расчет процесса размораживания мясных оковалков при трех коэффициентах  $\alpha$  (15, 20, 25) Вт/(м<sup>2</sup> град) и полученные результаты сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными (рис.5). Как следует из рис. 5, наилучшее совпадение экспериментальных данных с расчетом происходит при  $\alpha = 20-25$  Вт/(м<sup>2</sup> град).

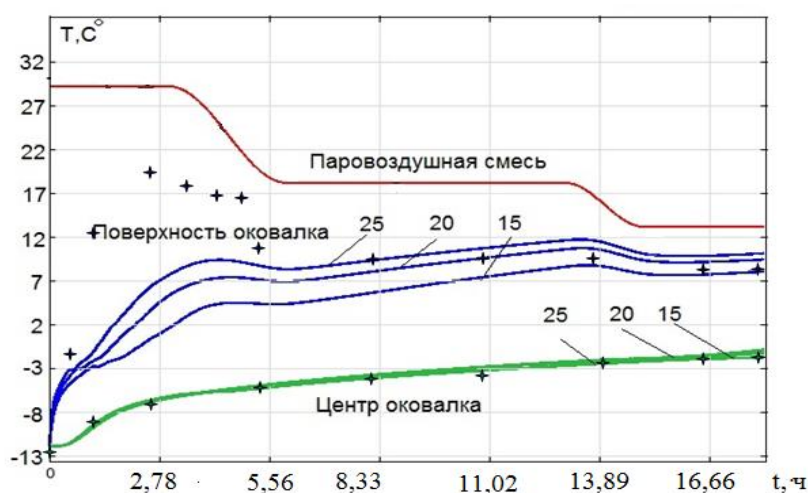


Рисунок 5. Численные зависимости температуры от времени при различных коэффициентах теплоотдачи. Звездочкой обозначены экспериментальные данные

Для определения коэффициента теплоотдачи поверхности мясного оковалка в реальных условиях паровоздушной среды был проведен эксперимент по его измерению в ОАО "Клинский мясокомбинат". Экспериментально измеренное значение коэффициента теплоотдачи поверхности, как функции времени, представлено на рис. 6.

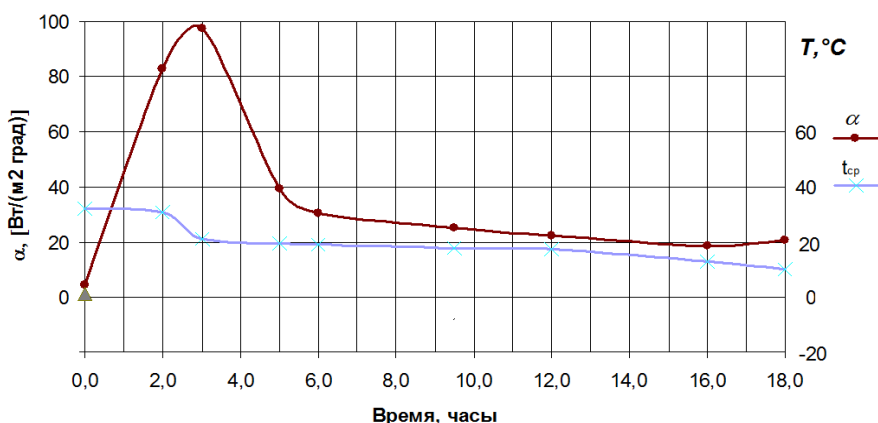


Рисунок 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени.

В первые часы нагрева коэффициент теплоотдачи имеет скачок, который вызван значительной конденсацией влаги на поверхности мяса. Этот скачок определяется, во многом, начальными условиями конкретного эксперимента и может существенно меняться от эксперимента к эксперименту. По этой причине, для получения более надежных результатов при численном моделировании целесообразно его не учитывать. Из рис. 6 следует, что со временем коэффициент теплоотдачи приближается к значению 20 Вт/(м<sup>2</sup> град).

На последнем этапе работы проведено сравнение температурных режимов нагрева мясной ткани при наличии в объеме множественных жировых включений и усредненных по объему оковалка физических характеристиках при  $\alpha = 20$  Вт/(м<sup>2</sup> град).

На рис. 7 представлено рассчитанное с помощью программы Comsol Multiphysics 4.3 [3] распределение температурного поля внутри оковалка с 27 жировыми включениями,

равномерно распределенными по его объему. Температурное поле в материале с усредненными по объему физическими характеристиками приведено на рис. 8. Из рис. 7 и рис. 8 следует, что температурные поля внутри оковалка практически не отличаются.

Наиболее часто используемый в современных паровоздушных камерах температурный режим паровоздушной среды имеет 3-х ступенчатый характер (рис. 9). На этом же рисунке также показаны зависимости температуры от времени в поверхностном слое и в центре оковалка. Небольшое отличие температуры на поверхности связано с тем, что теплоемкость на поверхности материала с жировыми включениями больше и, следовательно, температура растет медленнее, чем в материале без включений. На большом временном промежутке эти различия несущественны. В центре оковалка ход характеристик практически повторяет друг друга.

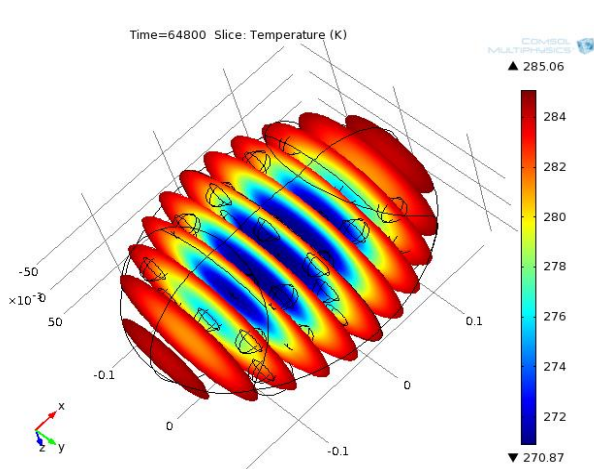


Рисунок 7. Температурное поле в оковалке с жировыми включениями

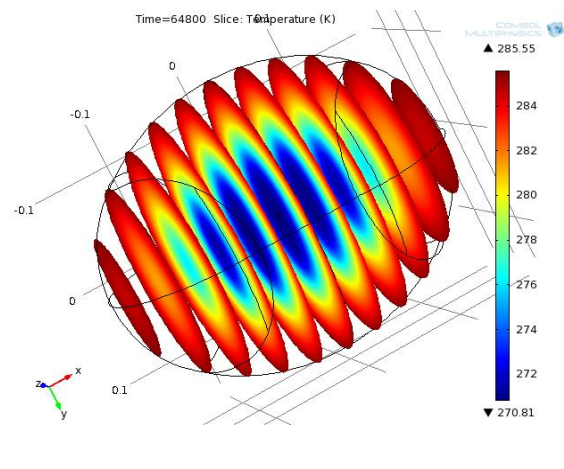


Рисунок 8. Температурное поле в оковалке с усредненными характеристиками

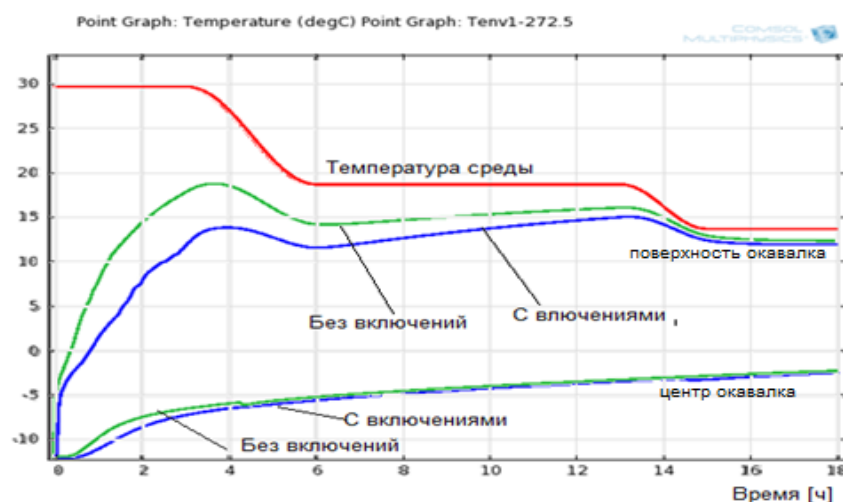


Рисунок 9. Зависимости температуры на поверхности и в центре оковалка от времени

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. 3D моделирование делает возможным расчет сложных теплофизических процессов в реальных средах с учетом фазовых переходов первого рода. При этом необходимо

достаточно точно аппроксимировать основные физические характеристики материала соответствующими температурными зависимостями.

2. Существенного упрощения в моделировании материалов с многочисленными (более 20) неоднородностями с минимальной потерей точности можно достичь, усредняя физические характеристики по объему исследуемого материала.

#### Библиографический список

1. K.W Farag, J.G.Lyng, D.J. Morgan, D. A. Cronin Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to +10 °C // *Meat Science*, **79** (2008), pp. 740-747
2. P. Rattanadecho Theoretical and experimental investigation of microwave thawing of frozen layer using a microwave oven (effects of layered configurations and layer thickness) // *International Journal of heat and mass transfer*, **47** (2004), pp. 937-945
3. <http://www.comsol.com>