

REFRIGERATION, FREEZING AND THAWING

THE XXth EUROPEAN MEETING OF MEAT RESEARCH INSTITUTES
THE ALL-UNION RESEARCH INSTITUTE OF MEAT INDUSTRY USSR
A HEATMETRIC STUDY INTO MEAT REFRIGERATION AND SHRINKAGE
V.G.FYODOROV, L.D.ANDREYEVA, D.N.ILYINSKY

SUMMARY

A procedure was devised and tested for measuring the components of heat flow and evaporated water flow during meat products refrigeration. As transducers, miniature heatmeters and heatmassmeters were used.

Data are presented on refrigeration dynamics and meat shrinkage at variable parameters of the cooling air.

RESUME

Il est étudié et élaboré la méthode du mesurage des composants du flux thermique et celui d'humidité en train de s'évaporer au cours du traitement frigorifique des produits carnés. On a utilisé comme indicateurs des fluxmètres thermiques et des appareils à mesurer la masse et le flux thermique en miniature.

On a amené les données concernant la dynamique du refroidissement et de la dessiccation de la viande aux paramètres variables de l'air de refroidissement.

DER XX. EUROPAISCHE KONGRESS DER FLEISCHFORSCHUNGSINSTITUTE
ALLUNIONS-FORSCHUNGSINSTITUT DER FLEISCHWIRTSCHAFT DER UdSSR
WÄRMETRISCHE UNTERSUCHUNG DER FLEISCHABKÜHLUNG UND
-AUSTROCKNUNG
W.G.FEDOROW, L.D.ANDREJEWA, D.N.ILJINSKIJ

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Methode zur Messung von Wärmeflußkomponenten und des Stroms der ausdampfenden Feuchtigkeit bei der Kältebehandlung von Fleischwaren ausgearbeitet und untersucht. Als Meßgeber wurden ganz kleine Wärmemesser und Wärmemassenmesser ausgenutzt.

Die Angaben über die Dynamik der Abkühlung und Austrocknung von Fleisch bei veränderlichen Parametern der Abkühlungsluft werden angeführt.

XX ЕВРОПЕЙСКИЙ КОНГРЕСС РАБОТНИКОВ НИИ МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ И УСУШКИ МЯСА
В.Г.ФЕДОРОВ, Л.Д.АНДРЕЕВА, Д.Н.ИЛЬИНСКИЙ

АННОТАЦИЯ

Разработан и исследован способ измерения компонентов теплового потока и потока испаряющейся влаги при холодильной обработке мясопродуктов. В качестве датчиков использованы миниатюрные теплотометры и тепломассометры.

Приведены данные по динамике охлаждения и усушки мяса при переменных параметрах охлаждающего воздуха.

REFRIGERATION, FREEZING AND THAWING

Усушка мясopодyктов при xолодильной обработке, хранении, отеплении и размораживании приводит к ухудшению качества и уменьшению количества мяса. Кроме того, она вызывает дополнительные энергетические затраты на проведение технологического процесса и очистку поверхностей охлаждающих приборов от инея. Интенсивность усушки неразрывно связана с интенсивностью теплообмена продукта с окружающим воздухом, эту связь можно выразить достаточно точно простым уравнением:

$$m = q_m \cdot p^{-1}, \quad (I)$$

где m - интенсивность усушки, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
 q_m - массообменная составляющая теплового потока, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;
 p - теплота фазового перехода, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Существующие методы исследования интенсивности теплообмена и усушки при обработке мясopодyктов между собой не связаны и позволяют получить лишь информацию, усредненную для всей поверхности продукта и времени процесса.

Нами разработан и внедрен метод измерения всех составляющих теплового и материального балансов процесса обработки мяса (конвективный, лучистый и массообменный компоненты теплового потока, поток массы испаряющейся влаги), локально по поверхности и во времени /1/. Метод основан на использовании нескольких миниатюрных теплометров (№1, 2, 3), имеющих разную степень черноты и различную диффузионную проницаемость.

Тепломеры представляют собой пластинку (рис. 1), в которую вмонтировано большое число (до 2000 штук на 1 см^2) дифференциальных термоэлементов-1, спаи которых располагаются поочередно на гранях-2 и 3 пластинки, а промежутки между ними заполнены эпоксидной смолой-4 /2/. Необходимая степень черноты поверхности тепломера (ε) достигается соответствующим чернением или наклейкой отрывающей фольги, термическое сопротивление (R) - степенью подпрессовки металлических термоэлементов. Необходимая диффузионная проницаемость (способность пропускать влагу) создается при помощи мелких сквозных отверстий-5 в направлении потоков тепла и массы.

Разность температур (ΔT) граней-2 и 3 тепломера, возникающая при прохождении через него теплового потока (q), приводит к возникновению электродвижущей силы, пропорциональной числу тер-

моэлементов 1:

$$\Delta T = q R \quad (2)$$

Токоcъемные проводники-6 для измерения этой силы подводятся к потенциометрической схеме.

Тепловой баланс для тепломера № 1, расположенного на поверхности продукта и реагирующего на все составляющие теплового потока, можно представить следующей формулой:

$$\frac{\Delta T_1}{R_1} = \alpha_1 (T_1 - T_a) + \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_a^4) + m \cdot p + \frac{\partial q_1}{\partial q_m} q_m + \frac{\partial q_1}{\partial q_c} q_c, \quad (3)$$

где α - коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$;
 T_1, T_a, T_0 - температуры наружной поверхности тепломера, воздуха и поверхности охлаждающих приборов, $^{\circ}\text{К}$;
 σ - постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$;
 q_c - "сухая" составляющая теплового потока (q).

Четвертое и пятое слагаемое баланса (3) учитывают взаимное влияние потоков тепла и влаги, проходящих через поверхность тепломера. Литературные данные по этому поводу противоречивы, большинство исследователей сходятся на том, что при плотностях потоков энергии и массы, проходящих через поверхность мясopодyктов, в условиях тепловой или холодильной обработки этим влиянием можно пренебречь.

Тепломеры № 2 и № 3 не пропускают потока влаги, для них отсутствует также третье слагаемое баланса (3), степень черноты тепломера № 3 возьмем возможно меньшей (практически $\varepsilon_3 = 0, 1-0, 25$). Размеры этих тепломеров невелики (площадь каждого равна $1-2 \text{ см}^2$), поэтому можно считать, что возможные отличия в свойствах пограничного слоя на этих участках выравниваются за счет поперечного потока массы, следовательно $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$.

Полгая для простоты результата, что $T_1 = T_2 = T_3$, а также приняв, что датчики размещены в зоне равномерных тепловых и массовых потоков, получим простые выражения для искомых компонентов теплового потока: лучистого (q_λ), конвективного (q_κ) и массообменно-

го (q_m):

$$\left. \begin{aligned} q_\lambda &= \varepsilon \frac{q_2 - q_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} \\ q_\kappa &= q_2 - q_\lambda \\ q_m &= q_1 - q_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ε - степень черноты поверхности мясopодyкта.

В действительности при холодильной обработке $T_3 > T_2 > T_1$, что вытекает из вышеприведенной формулы (1), если пользоваться тепломерами с одинаковыми R . Учет этого неравенства приводит к более сложной системе уравнений:

$$\left. \begin{aligned} q_\lambda &= \varepsilon \frac{q_2 - q_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} \left[1 + 4\sigma R (\varepsilon - \varepsilon_3) T_1^3 \right] \\ q_\kappa &= q_2 - q_\lambda \\ q_m &= (q_1 - q_2) \left(1 + R \frac{q_1 - q_2}{T_1 - T_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Поправки к первому и третьему уравнению системы (5) номографированы для интервала параметров, охватывающего практически случаи технологических процессов, поэтому усложнения расчетов при ее использовании не происходит. Кроме того эти поправки обычно не превышают 2-4%, следовательно, можно пользоваться системой (4).

Все три тепломера можно брать одинаковыми (с отверстиями) и закладывать под тонкий поверхностный слой мяса. Участок поверхности мяса против тепломера № 2 при этом заклеивают тонкой полиэтиленовой пленкой, против тепломера № 3 - фольгой. Полиэтиленовая пленка прозрачна для актуальных длин волн лучистой энергии, поэтому ее наличие не изменяет степени черноты поверхности продукта, и величины q_λ , q_κ и q_m можно рассчитывать по формулам (4) или (5), полагая в них, что $\varepsilon_1 = \varepsilon$, а R - суммарное сопротивление тепломера и слоя мяса над ним.

С помощью данного метода нами исследована кинетика компонентов потоков тепла и коэффициентов теплоотдачи при холодильной и тепловой обработках мясopодyктов, при постоянных параметрах охлаждающего воздуха /3, 4, 5/. На основании этих исследований предложен и обоснован новый поточный метод охлаждения или замораживания мясных полутоуш, который характеризуется плавным снижением скорости воздуха в процессе обработки /6/.

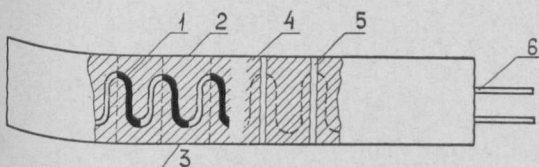


Рис. 1. Схема тепломера

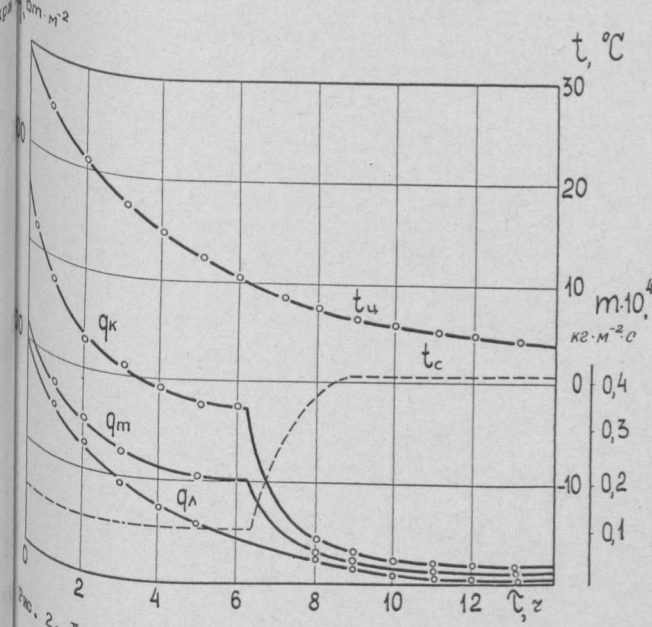


Рис. 2. Динамика охлаждения и усушки говяжьего мяса при ступенчатом изменении температуры воздуха

Исследование процесса охлаждения и усушки мяса при переменных скорости и температуре воздуха проводилось в лабораторных и производственных условиях.

Все три компонента теплового потока q_n , q_k и q_m имеют одинаковый порядок при охлаждении мяса за счет свободной конвекции и лучеиспускания. На рис. 2 представлена динамика изменения этих компонентов, а также потока массы и температур при одностороннем охлаждении образца говяжьего мяса толщиной 8 см в условиях двухступенчатого изменения температуры воздуха. Из рис. 2 видно, что теплоотвод и усушка при повышении температуры воздуха от -14 до $0,5^\circ\text{C}$ уменьшаются в 5-10 раз, и понижение температуры в центре образца происходит в дальнейшем за счет перераспределения его энтальпии. Максимальное расхождение в усушке образцов за время полного охлаждения, определенной интегрированием кривой $m = f(\tau)$ и весовым способом, не превышает 6,5%, что можно считать удовлетворительным, так как связано с дополнительными погрешностями в определении площади испарения образца и при интегрировании.

В производственных условиях, если не принимать специальных мер, лучистая составляющая теплового потока мала. Чтобы не тратить время на отыскание участков на поверхности туши, имеющих равномерные тепловые потоки, вместо трех тепломмеров, используют комбинированный тепломассомер /7/, упрощающий методику измерений. Он состоит из нескольких секций (рис. 3). Секции I и 2 содержат одинаковое количество (более 1000 шт.) дифференциальных термоэлементов-3. Коммутация секций позволяет получить на вторичном приборе сигнал каждой из них либо разностный сигнал. Секция I перфорирована сквозными отверстиями-4 диаметром 0,5 мм, с плотностью около 50 шт/см². Секции заформованы в общее охранное кольцо-5 диаметром 25 и высотой 1,8 мм.

Возможность измерять с помощью двухсекционных тепломассомеров тепловые потоки (q_m и q_k) и рассчитывать поток влаги (m) с помощью простых соотношений, вытекающих из формул (1) и (4)

$$q_m = q_1 - q_2; \quad q_k = q_2; \quad m = (q_1 - q_2) \rho^{-1} \quad (6)$$

проверялась на специальном градуировочном стенде /7/. Этот стенд имеет устройства, позволяющие задавать и измерять потоки массы и попутные им (охлаждение, замораживание) либо встречные (отепление, размораживание) потоки тепла. Результаты градуировок, представленные в системе координат $m - (q_1 - q_2)$, дают прямую линию с отклонением опытных точек от нее не более 1,5% верхнего предела интервала градуировки, охватывающего практические значения параметров, что подтверждает возможность использования приведенных соотношений (6) с достаточно высокой точностью.

Тепломассомеры закрепляются либо на поверхности мяса, либо под тонким слоем соединительной пленки, усушкой которой можно пренебречь. На рис. 4 представлена динамика суммарных тепловых потоков $q_k + q_m$, полученная с помощью трех тепломассомеров, размещенных в различных точках бедренной части говяжьей полутуши, при ступенчатом изменении скорости и постоянной температуре воздуха. Скорости воздуха в этих точках разные, поэтому тепловые потоки уменьшаются в разном темпе и тем быстрее, чем выше скорость воздуха (скорость при включенном вентиляторе составляла, м/с: I - 3,5; 2 - 2,5; 3 - 1,5). После выключения вентилятора темп уменьшения тепловых потоков стал одинаковым. При ступенчатом изменении скорости, как и при постоянной скорости воздуха /5/, в полулогарифмических координатах получаем отрезки прямых линий, что дает возможность обобщать кинетику тепловых потоков при охлаждении мяса в виде простых экспоненциальных зависимостей.

В опытах измеряли также перепады температур между поверхностью мяса и воздухом, что позволило рассчитать коэффициент суммарной и "сухой" теплоотдачи. На рис. 5 приведены результаты расчета для тепломассомера, динамика показаний которого изображена линией I на рис. 4. Суммарная теплоотдача вначале превышает "сухую" на 30% за счет отвода тепла с испаряющейся влагой, к концу процесса эта разница уменьшается в связи с образованием поверхностной корочки. При выключении вентилятора коэффициенты теплоотдачи резко падают и соответствуют величинам, полученным при свободной конвекции воздуха в производственных условиях /4/.

Проведенная работа позволила исследовать процесс охлаждения мясопродуктов с целью оптимизации по критерию, в который входят минимальные значения усушки, времени охлаждения и энергетических затрат.

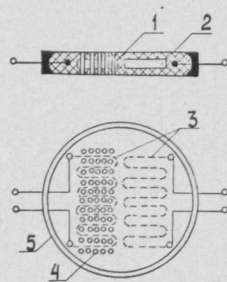


Рис. 3. Схема тепломассомера

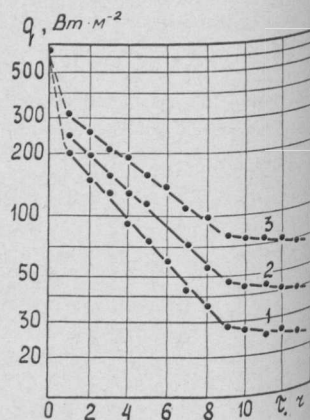


Рис. 4. Динамика суммарных тепловых потоков в разных точках бедренной части говяжьей полутуши при ступенчатом изменении скорости воздуха

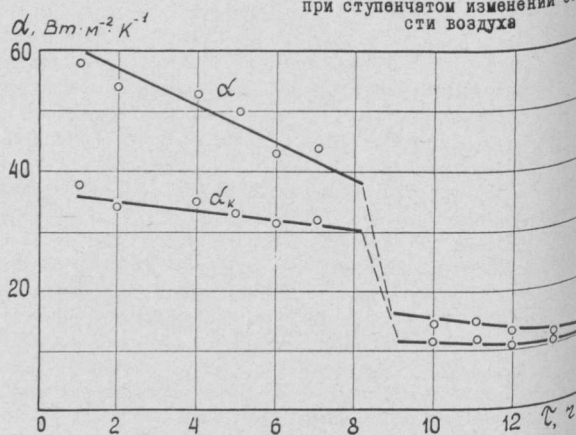


Рис. 5. Коэффициенты теплоотдачи от говяжьей полутуши при ступенчатом изменении скорости

ЛИТЕРАТУРА

- Ильинский Д.Н., Геращенко О.А., Федоров В.Г., Андреева Л.Д. Устройство для раздельного определения составляющих теплового потока при сложном теплообмене. Авт.свид. № 313097.
- Федоров В.Г., Геращенко О.А. Датчик для измерения локальных тепловых потоков. Авт. свид. № 159048.
- Федоров В.Г., Ильинский Д.Н., Геращенко О.А., Андреева Л.Д. Исследование теплоотдачи при охлаждении и замораживании мясных туш. "Холодильная техника" 8, 1971.
- Федоров В.Г., Ильинский Д.Н., Андреева Л.Д. Определение составляющих теплового потока при охлаждении полутуш. "Мясн.индустрия СССР", II, 1971.
- Fedorov V.G. Messung der Wärmeströme bei der Behandlung von Fleischprodukten. "Fleisch", 27, 1973, 2.
- Ильинский Д.Н. и др. Способ охлаждения и замораживания мясных туш. Авт.свид. № 357957.
- Федоров В.Г., Декуша Л.В., Шубенко Б.П. Датчик тепломассообмена. "Энергетика и электрификация", Киев, 5, 1973.