

УДК 664. 8.037.5

Анализ и совершенствование подходов определения доли вымороженной воды в мясе

Березовский Юрий Михайлович

И.о. заведующего лабораторией

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им.

В.М. Горбатова» РАН

Адрес: 127422, город Москва, ул. Костякова, д. 12

E-mail: birjuza1@mail.ru

Королёв Игорь Антонович

аспирант

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им.

В.М. Горбатова» РАН

Адрес: 127422, город Москва, ул. Костякова, д. 12

E-mail: gigia@yandex.ru

Саранцев Тарас Александрович

магистр

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем им.

В.М. Горбатова» РАН

Адрес: 127422, город Москва, ул. Костякова, д. 12

E-mail: codyjeps@gmail.com

Проведен ряд экспериментов с применением дифференциальной сканирующей калориметрии с целью определения доли вымороженной воды в образцах говядины и свинины. Проведен анализ известных зависимостей для расчёта вымороженной влаги в мясе таких как формулы Нагаока, Максвелла-Эйкена, Леви, Чижова, Рютова, а также преобразованной формулы Авраами, известной как формула расчёта доли закристаллизовавшейся массы при фазовом переходе одномерных полимеров. Анализ показал отсутствие универсальной формулы. Все зависимости имеют эмпирический характер, а константы каждой из них отражают влияние отдельных теплофизических характеристик замораживаемого продукта или процесса замораживания. Это обусловило необходимость предложить теоретически обоснованный вывод зависимости доли вымороженной воды в мясе с позиций формальной кинетики процесса замораживания как аналога химической реакции, в которой учтены влияние влажности исходного образца по Рютову, а также интенсивность процесса, т.е. темп охлаждения при замораживании. Полученная расчётная формула показала достаточно хорошую сходимость с результатами эксперимента.

Ключевые слова: вымороженная вода, расчётные зависимости, кристаллизация воды, кинетика процесса, говядина, свинина

Метод консервирования замораживанием сохранности продукции с минимальными потерями признан одним из лучших способов обеспечения потерями качества (Алямовский, 1968; Рогов,

1999; Чижов, 1979). Пищевые продукты по большей части содержат от 50% до 85 % воды, их замораживание сопровождается фазовым переходом воды из жидкого состояния в твёрдое (Алямовский, 1968; Латышев, 1992; Рогов, 1999; Чижов, 1979; Эванс, 2010). Современная наука позволяет выявить целый ряд аспектов процесса замораживания, изучение которых может способствовать его совершенствованию. Одним из направлений является изучение и использование специфики вымораживания воды, как процесса её кристаллизации при замораживании продукта (Постольский, 1970; Рогов, 1999; Чижов, 1979; МакКенна, 2008; Тагер, 2007; Sanz, 1987).

Как показывает практика, подтверждаемая приведенными выше авторитетными учёными, процесс кристаллизации воды, содержащейся в пищевых продуктах, а также в полимерах, ещё недостаточно изучен.

В определении криоскопической температуры, большинство работ приводят практически одинаковые результаты (Алямовский, 1968; Латышев, 1992; Рогов, 1999; Чижов, 1979; ASHRAE, 2014). Тогда как температура завершения процесса замораживания даётся во многих случаях неоднозначно (Дибирасулаев, 2016; Рогов, 1999). Отсюда трудности с определением достоверного значения доли вымороженной воды.

Наиболее общим определением доли вымороженной воды служит выражение:

$$\omega = \frac{G_{л\ddot{e}д}}{G_w}, \quad (1)$$

где: G_w – общее влагосодержание продукта, кг;

$G_{л\ddot{e}д}$ – масса закристаллизовавшейся при замерзании воды, кг.

Для определения зависимости доли вымороженной воды от криоскопической температуры и от общего содержания влаги в продукте предложен ряд различных методов (Алямовский, 1968; Латышев, 1992; Рютов, 1976; Чижов, 1979; Heiss, 1933; Nagaoka, 1955; Riedel, 1957; Riedel, 1964; Van der Sman, 2005).

Один из методов, предложенный Хайссом, относится к dilatометрическим, использующим большую разность плотностей льда и воды. Метод Риделя основан на графической интерпретации калориметрических измерений температур

продукта в процессе замораживания областей полного замораживания и области фазового перехода. Методика описана в [Постольский, 1970].

Проведенный Чижовым сопоставительный анализ подходов к определению вымороженной воды с применением известной закономерности Рауля послужил обоснованием формулы Нагаоки, описывающей процесс вымораживания воды формулой

$$\omega = 1 - \frac{t_{кр}}{t} = 1 - \frac{273 - T_{кр}}{273 - T}, \quad (2)$$

где: ω – доля вымороженной воды; $t_{кр}$ – криоскопическая температура, t – текущая температура по шкале Цельсия; $T_{кр}$ и T – криоскопическая и текущая температура по шкале Кельвина.

Чижовым была также предложена эмпирическая зависимость (3), представленная в зарубежной справочной литературе (ASHRAE, 2014).

$$\omega = \frac{1,105}{1 + \frac{0,7138}{\ln(272 - T + 1)}}, \quad (3)$$

Рютов, исследуя энергетику и прочность связи воды со структурами, формирующими каркас, мяса, предложил усовершенствованный вариант формулы Нагаоки с введением множителя, учитывающего содержание воды в исходном продукте и влагу, содержащуюся в сухом остатке:

$$\omega = \left(1 - \frac{273 - T_{кр}}{273 - T}\right) \cdot \left(1 - \sigma \cdot \frac{1 - W}{W}\right), \quad (4)$$

где W – содержание воды в исходном продукте, σ – то же в сухом остатке продукта.

Приведенные зависимости представляют собой эмпирические формулы расчёта вымороженной воды.

Экспериментальные методы приводятся в ряде работ как зарубежных так и отечественных учёных. Особой тщательностью экспериментов выделяются, выше приведенные работы Хайсса и Риделя, а также Латышева.

Тем не менее, до настоящего времени нет единого мнения: кристаллизуется ли вода полностью

или сохраняется в жидком или в стекловидном состоянии в структуре продукта. А также следует отметить отсутствие единого теоретического подхода к определению вымороженной воды в мясе.

Вымораживание воды можно представить как процесс кристаллизации низкомолекулярного вещества, аналога простейшего полимера. Представляет интерес возможность применить метод химической кинетики для описания процесса вымораживания. Так в теории химии полимеров известна формула Авраами (Бартенев, 1983; МакКенна, 2008; Тагер, 2007), представляющая чисто эмпирический подход к описанию процесса кристаллизации низкомолекулярных веществ:

$$a = 1 - e^{-k_0 t^n} \quad (5)$$

где a – доля вещества, подвергшегося фазовому превращению ко времени t ; k_0 – константа скорости процесса; n – константа, характеризующая тип зародышеобразования для данного вещества и тип растущих структур, может принимать значения от 1 до 4.

Нетрудно видеть аналогию $a \sim \omega$. Здесь t – время, с. Для сравнения (5) с зависимостями (1), (2), (3) положим, что темп изменения температуры при кристаллизации постоянен, т.е. $\beta = \theta / t = const$, здесь θ – температура, К.

Тогда

$$a = \omega = 1 - e^{-k \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^n} = 1 - e^{-k \left(\frac{T_{кр} - T}{\beta}\right)^n} \quad (6)$$

Условие $\beta = const$, К/мин широко используется при исследовании теплофизических характеристик пищевых продуктов методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

Анализ приведенных формул позволяет сделать некоторые выводы о специфике их компонентов и соответствии справочным эмпирическим данным.

- Формула 1 – Нагаоки, представляет зависимость вымороженной воды только от криоскопической и текущей температуры.

- Формула-2 – получена Рютовым путём анализа энергии связи воды с сухим каркасом продукта, что объясняет невозможность полного вымораживания воды (Рютов, 1976; Чижев, 1979).
- Формула (3) – Чижева, определяет эмпирическую зависимость только от криоскопической и текущей температур. При экстраполяции формулы до температур близких к нулю по Кельвину доля вымороженной воды не равна нулю. Формула приведена в справочнике (ASHRAE, 2014).
- Формула 4 – Авраами, в преобразованном виде (6) позволяет определить долю вещества, закристаллизовавшегося при охлаждении с постоянным температурным темпом β .

Следует отметить отсутствие единого подхода к определению вымороженной воды в мясе, что обуславливает необходимость экспериментально определить долю вымороженной воды в мясе и разработать теоретически обоснованную зависимость доли вымороженной воды, верифицированную по результатам экспериментов.

Цель работы: разработать зависимость для расчёта вымороженной воды путём анализа кинетики процесса вымораживания, верифицируя её по результатам определения доли вымороженной воды в мясе методом дифференциального сканирования.

Объекты и методы исследований

В соответствии с методами применения дифференциальной сканирующей калориметрии, представленной в (Белозёров, 2016; Симатос, 1980; Höhne, 2003) авторами разработан метод определения доли вымороженной влаги мяса и мясопродуктов, в соответствии с которым доля вымороженной влаги в образцах при замораживании продукта рассчитывается на основе анализа первичного влагосодержания продукта и теплоемкости. При этом ДСК-метод подвергнут τ -R коррекции согласно (Höhne 2003).

Всего по ГОСТ 31476-2012 «Мясо свинины» предусмотрено шесть категорий и одиннадцать классов. Говядина разделяется по качественным группам NOR, DFD, PSE (Временная технологическая инструкция,

1995), в зависимости от значений активной кислотности среды (рН), влагоудерживающей способности и цвета мяса. Эти факторы вносят свою специфику в результаты экспериментов по определению теплофизических характеристик мяса и замороженной воды в частности.

Теплота фазового перехода рассчитывается по следующему соотношению:

$$\omega(t) = \left[1 - \frac{\int_{t_1}^t (C_{\text{рОб}} - C_{\text{рБл}}) dt}{\Delta i_{\text{ф.п.}}} \right] \cdot \frac{\Delta i_{\text{ф.п.}}}{L \cdot w} \quad (7)$$

где: L - удельная теплота льдообразования при замораживании воды, $L = 333,4$ кДж/кг при $t = 0^\circ\text{C}$; w - доля влаги содержащейся в исследуемом образце, t_1, t - температура, практически полного замораживания продукта и текущее значение температуры; $C_{\text{рОб}}$; $C_{\text{рБл}}$ - удельные теплоёмкости образца и базовой линии ДСК - кривой, Дж/кг·К; Δi - площадь пика фазового перехода Дж/кг.

Слагаемое в скобках позволяет рассчитать характер изменения доли замороженной влаги в образце, а

множитель $\frac{\Delta i_{\text{ф.п.}}}{L \cdot w}$ отражает неполноту

вымораживания всей влаги, содержащейся в образце. Недостатком этого метода считается неопределённое значение температуры полного замерзания продукта.

Авторами предложен подход к определению доли замороженной воды путём анализа кинетики процесса замораживания мяса, который позволяет получить зависимость не только от температуры, влажности исходного продукта, но и с учётом специфики охлаждения, обусловленной темпом охлаждения. Такой подход к процессу замораживания и размораживания продукта как к аналогу химической реакции первого рода (Общая химия, 2009), где в качестве аргумента выступает температура, позволяет получить физически оправданным методом зависимость доли замороженной воды от температуры, влажности и темпа охлаждения продукта.

В данном случае возможно применение дифференциального уравнения вида

$$\frac{d\omega}{dt} = n \cdot \frac{(1 - \omega)}{(t_{\text{кп}} - 273)}, \quad (8)$$

где ω - доля замороженной влаги;

t - температура; К; $t_{\text{кв}}=273$ К криоскопическая температура воды, К;

n - константа, характеризующая интенсивность замораживания конкретного продукта.

Сопоставление данных экспериментального определения замороженной воды и результатов полученных расчётным путём, позволяет оценить эффективность теоретического подхода к исследованию процесса замораживания воды.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования доли замороженной влаги, содержащейся в образцах говядины качественных групп NOR и DFD, а также свинины различных категорий качества (1, 2, 4), представлены на Рисунках 1 и 2. Хорошее совпадение в значениях доли замороженной влаги в исследуемых образцах обусловлено близкими значениями энтальпии фазового перехода и влагосодержания, исходных образцов. Кривая теплоёмкости говядины построена по результатам 6 - реализаций эксперимента как средняя арифметическая данных (Рис. 2).

Согласно литературным данным (Рютов, 1976; Чижов, 1979) наибольшее признание получила формула с поправкой Рютова, что позволяет в качестве кривой сравнения использовать зависимость (4) - кривая «по Рютову».

Обсуждения

Проведённый анализ существующих методов определения замороженной воды, позволяет сделать вывод об отсутствии единого теоретического подхода. Предлагается рассматривать процесс замораживания, как аналог химической реакции, к описанию которой, возможно применение кинетической теории химических реакций (Общая химия, 2009).

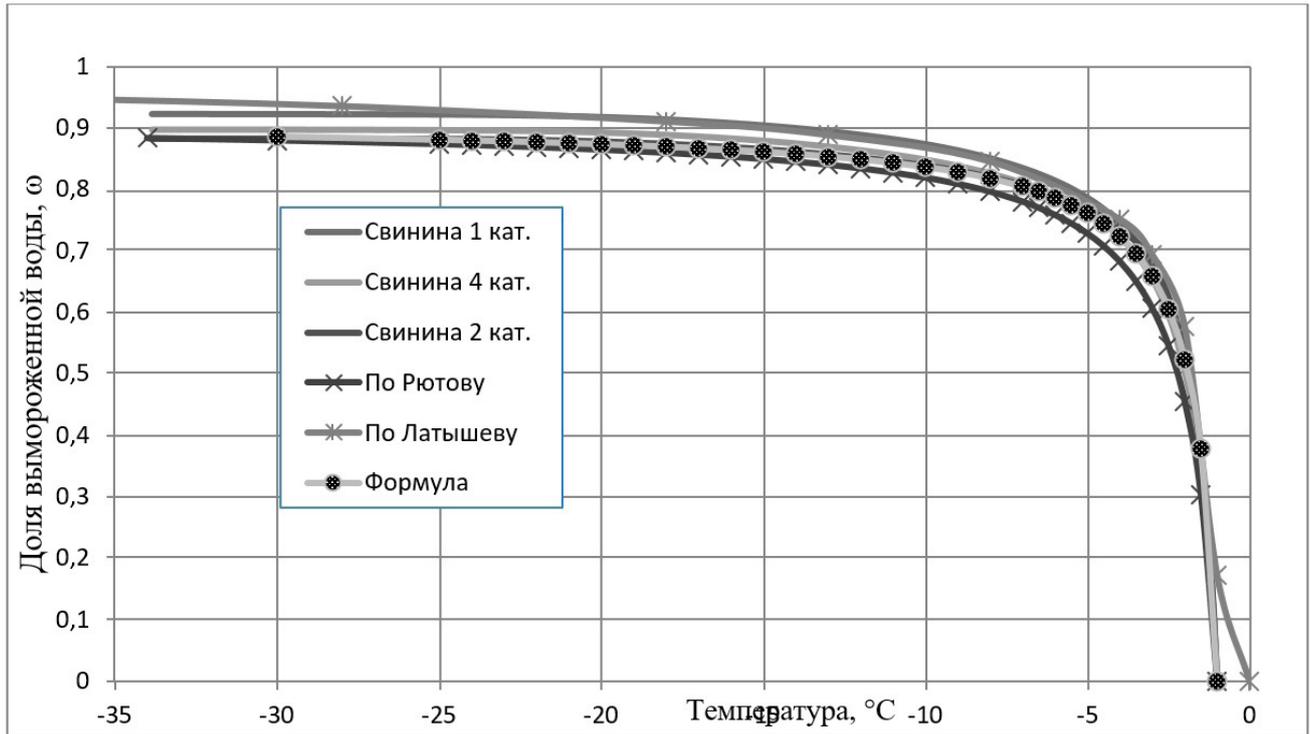


Рисунок 1. Экспериментальные значения доли вымороженной влаги в образцах свинины различных качественных категорий в сравнении с расчётами: по Рютову (формула 3) $\sigma=0,257$; по Латышеву; по формуле (12) при $n=0,7$, $\sigma = 0,257$. Расчетная зависимость по (12) оценивается коэффициентом детерминации: для говядины $R^2_{гов}=0,987$

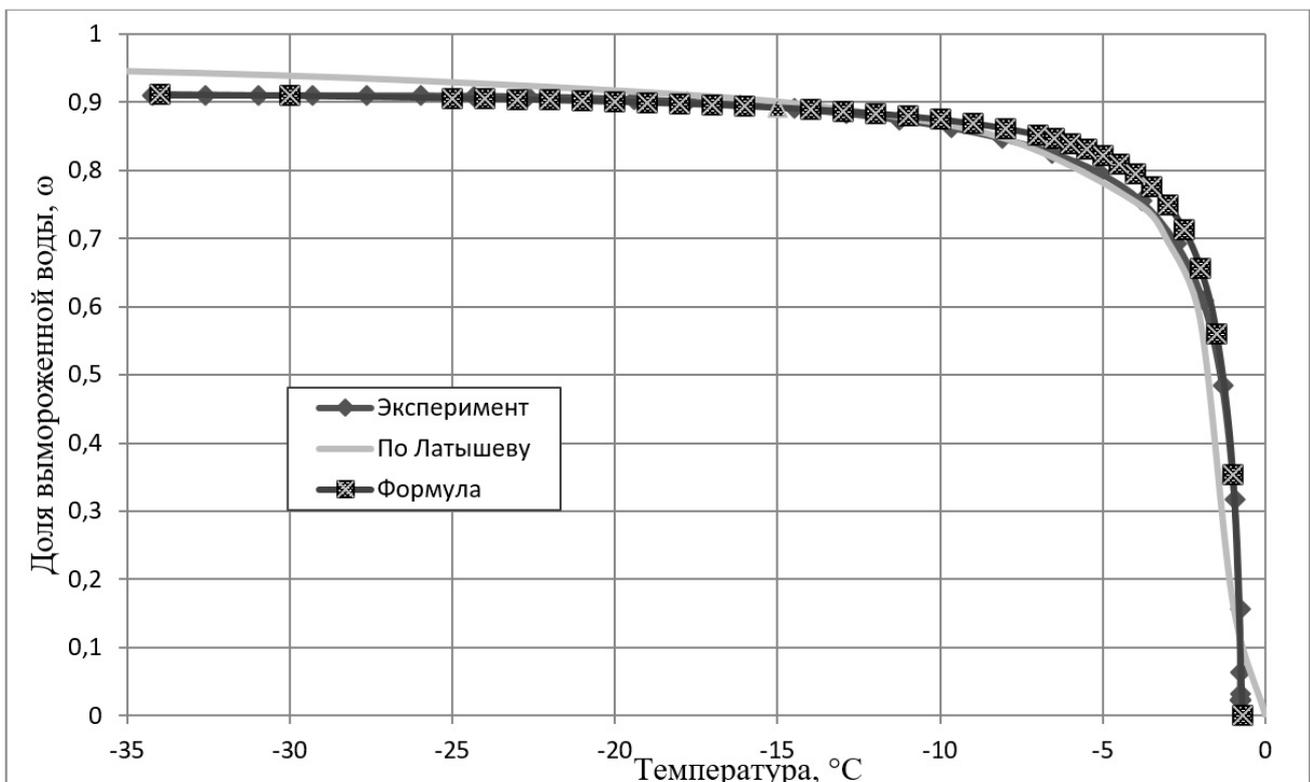


Рисунок 2. Экспериментальные значения доли вымороженной влаги в образцах говядины. Значения констант к формуле (12) при $n=0,8$, $\sigma = 0,256$. Расчетная зависимость по (12) оценивается коэффициентом детерминации: для говядины $R^2_{гов}=0,987$,

Интегрируя уравнение (7), получим

и далее

$$\omega = 1 - \frac{C}{(t_{kw} - t)^n} \quad (10)$$

Значение константы находим из естественного граничного условия: $\omega = 0$ при $t = t_{kr}$, где t_{kr} – криоскопическая температура продукта (мяса), К; $t_{kw} = 273$ К – криоскопическая температура воды.

Необходимо также учесть влияние влажности исходного продукта на долю вымороженной воды, что подтверждается рядом авторов применением известной зависимости Рютова (Чижов, 1979; Рогов, 1999).

Таким образом

$$C = (t_{kw} - t_{kr})^n \cdot f(W) \quad (11)$$

где W – общее содержание воды в мясе, кг/кг; $f(W)$ – функция, учитывающая влияние исходной влажности продукта на долю вымороженной воды.

Выражение (10) принимает окончательный вид

$$\omega = 1 - \left(\frac{t_{kw} - t_{kr}}{t_{kw} - t} \right)^n \cdot f(W) \quad (12)$$

Выражение (11) при $n = 1$; $f(W) = 1$ представляет собой известную зависимость Нагаоки.

Отличительным элементом зависимости (11) от всех ранее приведенных зависимостей, определяющих долю вымороженной воды, является показатель степени n , характеризующий интенсивность процесса вымораживания.

По результатам проведенного анализа зависимость (12) позволяет получить наиболее обоснованные данные по доле вымороженной воды в продукте с учётом поправки Рютова

$$\omega = \left[1 - \left(\frac{T_{кр.вод} - T_{кр.мяс}}{T_{кр.вод} - T} \right)^n \right] \cdot \left(1 - \sigma \frac{1-W}{W} \right) \quad (13)$$

В качестве верификации формулы (13) на Рис. 1 и Рис. 2 приведены кривые, построенные по формуле (13). Соответствующие числовые значения констант приведены в подрисуночных надписях.

Таким образом, можно считать, что верификация предложенной зависимости (12) путём сравнения с экспериментальными данными по доле вымороженной воды в говядине и свинине свидетельствует о возможности применения её для расчётов процессов холодильной обработки мяса и мясных продуктов.

Заключение

Обзор различных расчётных методов определения вымороженной воды в замороженном мясе показал отсутствие единого подхода. Большинство расчётных зависимостей вымороженной воды используют две базовые величины: криоскопическую температуру и исходную влажность продукта. Экспериментальные методы также не лишены недостатков. Результаты определения вымороженной воды методом дифференциальной калориметрии в настоящее время признаются наиболее достоверными экспериментальными данными.

Авторами предложены два метода определения доли вымороженной воды.

С использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии получены экспериментальные данные по доле вымороженной воды в образцах говядины качественных групп NOR и DFD, а также в образцах свинины 2 и 4 категорий.

Сравнительный анализ расчётных кривых доли вымороженной воды, определяемых соответствующими зависимостями позволяет определить степень их соответствия реальным процессам вымораживания воды.

Методом формальной кинетики химических реакций получена расчётная зависимость доли вымороженной воды в мясе. Данный метод может быть использован при анализе процесса кристаллизации воды в продукте.

Результаты эксперимента представляют собой объективную оценку адекватности расчётных зависимостей.

Литература

- Алямовский И.Г. Теплофизические характеристики пищевых продуктов при замораживании // Холодильная техника. 1968. №. 5. С. 35-36.
- Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа, 1983. 392 с.
- Белозеров А.Г., Березовский Ю.М., Королев И.А. Подходы к оптимизации параметров температурной программы дифференциальной сканирующей калориметрии для обеспечения стабильного режима исследований при отрицательных температурах // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №. 12 (54). Часть 1. С. 120-124.
- Временная технологическая инструкция оценки говядины и свинины по группам свойств в шкале PSE, NOR, DFD. М.: ВНИИМП, 1995. 12 с.
- Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: ВО «Агропромиздат», 1990. 286 с.
- Дибирасулаев М.А. и др. Влияние субкриоскопической температуры хранения на количество вымороженной воды в NOR и DFD говядине // Теория и практика переработки мяса. 2016. Т. 1. №. 2. С. 18-25.
- Латышев В.П. Рекомендованные справочные материалы для проведения тепловых расчетов пищевых продуктов. М.: НПО АГРОХОЛОДПРОМ, 1992. 86 с.
- МакКенна Б.М. Структура и текстура пищевых продуктов. Продукты эмульсионной природы. М.: Профессия, 2008. 471 с.
- Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов / Под ред. Д.А. Ершова. М.: «Высшая школа», 2009. 560 с.
- Постольский Я., Груда З. Замораживание пищевых продуктов. М.: Пищевая пром-ть, 1970. 607 с.
- Рогов И.А., Куцакова В.Е., Филиппов В.И., Фролов С.В. Консервирование пищевых продуктов холодом (Теплофизические основы). М.: Изд. "Колос", 1999. 288 с.
- Рютов Д.Г. Влияние связанной воды на образование льда в пищевых продуктах при их замораживании // Холодильная промышленность. 1979. №5. С.32-37.
- Симатос Д., Фоур М., Бонжур И., Коуч И. Применение дифференциального термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при изучении воды в пищевых продуктах // Вода в пищевых продуктах. Под ред. Р.Б. Дакуорта. М.: Пищевая промышленность, 1980. 370 с.
- Тагер А.А. Физико химия полимеров. М.: «Научный мир», 2007. 574 с.
- Чижев Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. М.: «Пищевая промышленность», 1979. 272 с.
- Эванс Дж.А. Замороженные пищевые продукты. Производство и реализация. СПб.: Профессия, 2010. 440 с.
- ASHRAE HANDBOOK – Refrigeration Chapter: Thermal Properties of Foods. ASHRAE, 2014. 926 p.
- Heiss R.Z. Untersuchungen über den Kältebedarf und die ausgefrorenen Wasser mengen beim schnellen und beim langsamen Gefrieren von Lebensmitteln // Kälteind. Bd. 1933. Т. 40. P. 97.
- Höhne G.W.H., Hemminger G.F., Flammenheim H.J. Differential Scanning Calorimetry. Springer, 2003. 298 p.
- Kaale L.D. et al. Superchilling of food: A review // Journal of food engineering. 2011. Т. 107. №. 2. P. 141–146.
- Nagaoka J., Takagai S., Hotanai S. Experiments on the freezing of fish in an air-blast freezer // Proceedings of Commission IV, IX International Congress of Refrigeration. Vol. 2. 1955. P. 321-325.
- Pongsawatmanit R., Miyawaki O. Measurement of temperature-dependent ice fraction in frozen foods // Bioscience, biotechnology, and biochemistry. 1993. Т. 57. №. 10. P. 1650–1654.
- Riedel L. Kalorimetrische untersuchungen über das gefrieren von fleisch // Kältetechnik. 1957. Т. 9. №. 2. P. 38-42.
- Riedel L. Kalorimetrische Untersuchungen an Fleisch und Eiklar // Kältetechnik. 1964. Т. 16. №. 1. P. 363-366.
- Sanz P.D., Alonso M.D., Mascheroni R.H. Thermophysical properties of meat products: General bibliography and experimental values // Transactions of the ASAE. 1987. Т. 30. №. 1. P. 283–290.
- Van der Sman R.G.M., Boer E. Predicting the initial freezing point and water activity of meat products from composition data // Journal of Food Engineering. 2005. Т. 66. №. 4. P. 469–475.

Analysis and Improvement of Approaches to Determine the Ice Fraction Water in Meat

Yuriy M. Berezovsky

*All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry – a branch of
V.M. Gorbatov Federal
Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences
12 Kostyakova, Moscow, Russian Federation, 127422
E-mail: birjuza1@mail.ru*

Igor A. Korolev

*All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry – a branch of
V.M. Gorbatov Federal
Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences
12 Kostyakova, Moscow, Russian Federation, 127422
E-mail: gigia@yandex.ru*

Taras A. Sarantsev

*All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry – a branch of
V.M. Gorbatov Federal
Research Center for Food Systems of Russian Academy of Sciences
12 Kostyakova, Moscow, Russian Federation, 127422
E-mail: codyjeps@gmail.com*

A series of measurements of ice fraction in the samples of beef and pork by differential scanning calorimetry are conducted. The analysis of known dependences for calculation of the frozen-out moisture in meat such as Nagaoka, Maxwell-Aiken, Levi, Chizhov, Ryutov formulas, as well as the converted Avraami formula, known as the formula for calculating the proportion of crystallized mass in the phase transition of one-dimensional polymers, is shown. The analysis demonstrated the absence of a universal formula. All dependencies are empirical, and the constants of each of them reflect the influence of individual thermophysical characteristics of the frozen product or the freezing process. This made it necessary to propose a new theoretical correlation for the dependence of the ice fraction in the meat from the standpoint of the formal kinetics of the freezing process as an analogue of the chemical reaction, which takes into account the influence of the humidity of the original sample by Ryutov, as well as the intensity of the process, i.e. the cooling rate during freezing. The obtained calculation formula showed quite good convergence with the results of the experiment.

Keywords: frozen water, calculated dependencies, water crystallization, process kinetics, beef, pork

References

- Alyamovskij I.G. Teplofizicheskie karakteristiki pishchevyh produktov pri zamorazhivanii [Thermophysical characteristics of food during freezing] // Holodilnaya tekhnika. – 1968. – №. 5. – S. 35-36. (in Russian)
- Bartenev G.M. Fizika i mekhanika polimerov [Physics and mechanics of polymers] / G.M. Bartenev, YU.V. Zelenev.- M.: Vysshaya shkola, 1983.- 392 S. (in Russian)
- Belozerov A. G., Berezovskij YU. M., Korolev I. A. Podhody k optimizacii parametrov temperaturnoj programmy differencialnoj skaniruyushchej kalorimetrii dlya obespecheniya stabilnogo rezhima issledovaniy pri otricatelnyh temperaturah [Approaches to optimizing the parameters of the temperature program of differential scanning calorimetry to ensure a stable mode of research at negative temperatures] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2016. – №. 12 (54)– S. 120-124. (in Russian)
- Vremennaya tekhnologicheskaya instrukciya ocenki govyadiny i svininy po gruppam svojstv v shkale PSE, NOR, DFD [Temporary technology instruction evaluation of beef and pork by property groups in the scale PSE, NOR, DFD] – M.: VNIIMP. – 1995.- S. 12 (in Russian)

- Ginzburg A.S., Teplofizicheskie harakteristiki pishchevyh produktov. Spravochnik [Thermophysical characteristics of food. Handbook] /A.S. Ginzburg, Gromov M.A., Krasovskaya G.I.- M.: VO «Agropromizdat», 1990.- 286 s. (in Russian)
- Dibirasulaev M. A. et. al Vliyanie subkrioskopicheskoy temperatury hraneniya na kolichestvo vymorozhennoj vody v NOR i DFD govyadine [The effect of sub-cryoscopic storage temperature on the amount of frozen water in NOR and DFD beef]// Teoriya i praktika pererabotki myasa. – 2016. – T. 1. – №. 2.- S. 18-25. (in Russian)
- Latyshev V.P. Rekomendovannye spravochnye materialy dlya provedeniya teplovyh raschetov pishchevyh produktov [Recommended reference materials for thermal calculations of food] .- M.: NPO AGROHOLODPROM, 1992.- 86 s. (in Russian)
- MakKenna B. M. Struktura i tekstura pishchevyh produktov. Produkty ehmulSIONnoj prirody. [The structure and texture of food. Emulsion type products] – Professiya, 2008. – 471 s. (in Russian)
- Obshchaya himiya. Biofizicheskaya himiya. Himiya biogennyh ehlementov [General chemistry. Biophysical chemistry. Chemistry of biogenic elements] /Pod red. D.A. Ershova.- M.: «Vysshaya shkola», 2009.- 560 s.
- Postolskij YA. Zamorazhivanie pishchevyh produktov [Food freezing] /YA. Postolskij, Z. Gruda.- M.: Pishchevaya prom-t, 1970.- 607 s. (in Russian)
- Rogov I.A. Konservirovanie pishchevyh produktov holodom (Teplofizicheskie osnovy) [Cold preservation of food products (Thermophysical bases)] /I.A. Rogov, V.E. Kucakova, V.I. Filippov, S.V. Frolov./- M.:Izd. «Kolos, 1999.- 288 s. (in Russian)
- Ryutov D.G. Vliyanie svyazannoj vody na obrazovanie l'da v pishchevyh produktah pri ih zamorazhivanii. [Influence of bound water on the formation of ice in food products during their freezing] // Holodil'naya promyshlennost', 1979, №5.- S.32-37. (in Russian)
- Simatos D. Primenenie differencial'no termicheskogo analiza i differencial'nojskaniruyushchej kalorimetrii pri izuchenii vody v pishchevyh produktah [The use of differential thermal analysis and differential scanning calorimetry in the study of water in food] //D.Simatos, M. Four/ I.B.A.N.A., Dizhonskij universitet, Dizhon, Franciya, I Bonzhur, M. Kouch Centr yadernyh issledovaniy, Grenobl', Franciya v knige «Voda v pishchevyh produktah». Pod red. R.B Dakuorta.- M.: Pishchvaya promyshlennost', 1980.- 370 c. (in Russian)
- Tager A.A. Fiziko himiya polimerov [Physical chemistry of polymers].- M.: «Nauchnyj mir», 2007. - 574 s. (in Russian)
- Chizhov G.B. Teplofizicheskie processy v holodil'noj tekhnologii pishchevyh produktov [Thermophysical processes in food technology refrigeration] / G.B. CHizhov.- M.: «Pishchevaya promyshlennost'», 1979.- 272 s. (in Russian)
- Dzhudit A. Ehvans Zamorozhennye pishcheve produkty. Proizvodstvo i realizaciya [Frozen food. Production and sales] //Perevod s angl. yaz. VD SHirokova/Dzhudit A. EHvans.-Sankt-Peterburg.: Professiya. – 2010.- 440 s. (in Russian)
- ASHRAE HANDBOOK – Refrigeration Chapter: Thermal Properties of Foods.- ASHRAE, 2014.- 926 p.
- Heiss R. Z. Untersuchungen über den Kältebedarf und die ausgefrorenen Wasser mengen beim schnellen und beim langsamen Gefrieren von Lebensmitteln // Kälteind. Bd. – 1933. – T. 40. – 97 p.
- Höhne G.W.H. Differential Scanning Calorimetry/ G.W.H. Höhne, G.F. Hemminger, H. J. Flammenheim. -Springer, 2003.-298 p.
- Kaale L.D. et al. Superchilling of food: A review // Journal of food engineering. – 2011. – T. 107. – №. 2. – pp. 141–146.
- Nagaoka J., Takagai S., Hotanai S Experiments on the freezing of fish in an air-blast freezer // Proceedings of Commission IV, IX International Congress of Refrigeration. Paris, Vol. 2, 1955.-p.321-325.
- Pongsawatmanit R., Miyawaki O. Measurement of temperature-dependent ice fraction in frozen foods //Bioscience, biotechnology, and biochemistry. – 1993. – T. 57. – №. 10. – C. 1650–1654.
- Riedel L. Kalorimetrische untersuchungen über das gefrieren von fleisch //Kältetechnik. – 1957. – T. 9. – №. 2. – pp. 38-42.
- Riedel L. Kalorimetrische Untersuchungen an Fleisch und Eiklar //Kältetechnik. – 1964. – T. 16. – №. 1. – pp. 363-366.
- Sanz P.D., Alonso M.D., Mascheroni R.H. Thermophysical properties of meat products: General bibliography and experimental values // Transactions of the ASAE. – 1987. – T. 30. – №. 1. – pp. 283–0290.
- Van der Sman R.G.M., Boer E. Predicting the initial freezing point and water activity of meat products from composition data //Journal of Food Engineering. – 2005. – T. 66. – №. 4. – pp. 469–475.