

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2462>
<https://elibrary.ru/PBIYUP>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Влияние сухого созревания на белки мышечной ткани говядины



Г. В. Гуринович^{1,*}, И. С. Патракова¹, В. А. Хренов¹,
М. В. Патшина¹, А. И. Шевченко²

¹ Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

² Горно-Алтайский государственный университет^{ROR}, Горно-Алтайск, Россия

Поступила в редакцию: 26.04.2023

Принята после рецензирования: 19.06.2023

Принята к публикации: 04.07.2023

*Г. В. Гуринович: gguv55@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-7869-4151>

И. С. Патракова: <https://orcid.org/0000-0001-6147-0899>

В. А. Хренов: <https://orcid.org/0000-0003-1713-9407>

М. В. Патшина: <https://orcid.org/0000-0002-2047-3644>

А. И. Шевченко: <https://orcid.org/0000-0002-7753-1761>

© Г. В. Гуринович, И. С. Патракова,
В. А. Хренов, М. В. Патшина, А. И. Шевченко, 2023



Аннотация.

Качество мяса формируется на разных этапах производства, хранения и переработки. Среди них значение имеет созревание, технологии которого позволяют регулировать интенсивность биохимических процессов и связанных с ними свойств мяса. Один из трендов в развитии технологий созревания – это сухое созревание в течение длительного времени в условиях, ограничивающих рост микроорганизмов. Актуальность исследования определяет такой аспект формирования качества мяса сухого созревания, как изменение белковой составляющей.

Исследовали образцы, выделенные из внутренней части костных спинно-поясничных отрубов полутуш говядины породы герфорд сибирской селекции после 21, 35 и 42 суток сухого созревания (температура 0–1 °С, относительная влажность воздуха 74–75 %, скорость движения воздуха 0,5 м/с). На сухое созревание отруба подавали после выдержки в течение 1 суток при 4 °С. Контролировали фракционный состав белков методом вертикального электрофореза с использованием камеры Mini-Protean Tetra System, аминокислотный состав – методом ВЭЖХ (хроматограф жидкостной Shimadzu LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором Shimadzu SPD20MA, разделительная колонка Kromasil C-18), переваримость белков – последовательным воздействием системы протеиназ пепсин – трипсин в условиях, имитирующих желудочное пищеварение.

Длительное сухое созревание сопровождается развитием протеолиза под действием эндогенных ферментов. Результаты анализа электрофореграмм позволяют говорить о том, что протеолитические изменения высокомолекулярных миофибриллярных белков высококачественной говядины становятся более выраженными с увеличением продолжительности сухой выдержки. Распределение фракций белков по стадиям сухого созревания свидетельствует о разной скорости деградации сократительных и регуляторных белков и белков цитоскелета. Это влияет на нарушение структурной целостности мышечных волокон, формирование нежности мяса и доступность белков пищеварительным ферментам. Результаты определения аминокислотного состава и переваримости белков *in vitro* позволяют говорить о повышении пищевой ценности говядины и доступности белков действию протеиназ к 42 суткам сухого созревания.

Длительное сухое созревание способствует повышению усвояемости мышечных белков высококачественной говядины. Это обусловлено развитием протеолиза с накоплением низкомолекулярных фракций, выраженного к 42 суткам созревания, и умеренными окислительными изменениями белков.

Ключевые слова. Мясо, говядина, сухое созревание, протеолиз, фракции белков, аминокислоты, усвояемость белков

Финансирование. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием Кемеровского государственного университета (КемГУ)^{ROR} в рамках соглашения № 075-15-2021-694 от 05.08.2021, заключенного между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)^{ROR} и КемГУ (уникальный идентификатор контракта RF----2296.61321X0032).

Для цитирования: Влияние сухого созревания на белки мышечной ткани говядины / Г. В. Гуринович [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 621–629. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2462>

Effect of Dry Aging on Beef Muscle Proteins



Galina V. Gurinovich^{1,*}, **Irina S. Patrakova¹**,
Vladislav A. Khrenov¹, **Marina V. Patshina¹**,
Antonina I. Shevchenko²

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

² Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russia

Received: 26.04.2023

Revised: 19.06.2023

Accepted: 04.07.2023

*Galina V. Gurinovich: ggu55@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-7869-4151>

Irina S. Patrakova: <https://orcid.org/0000-0001-6147-0899>

Vladislav A. Khrenov: <https://orcid.org/0000-0003-1713-9407>

Marina V. Patshina: <https://orcid.org/0000-0002-2047-3644>

Antonina I. Shevchenko: <https://orcid.org/0000-0002-7753-1761>

© G.V. Gurinovich, I.S. Patrakova, V.A. Khrenov,
M.V. Patshina, A.I. Shevchenko, 2023



Abstract.

Meat is an inherent part of human diet. Its quality develops at different stages of production, storage, and processing. In this respect, the stage of aging is especially important. This technology makes it possible to regulate biochemical processes in meat raw materials. Long-term dry aging is a promising method that presupposes conditions that limit the growth of microorganisms. The transformations in the protein component are an important but understudied aspect of meat quality formation during dry aging.

The research featured Hereford beef carcasses of Siberian breeding. The samples were isolated from the inner part of bone spinal-lumbar cuts after 21, 35, and 42 days of dry aging under the following conditions: 0–1°C, 74–75% relative humidity, 0.5 m/s air velocity. The samples were subjected to dry aging after 24 h at 4°C. The fractional composition of proteins was controlled by vertical electrophoresis in a Mini-Protean Tetra System chamber. The amino acid composition was defined by high-performance liquid chromatography in a Shimadzu LC-20 Prominence liquid chromatograph with a Shimadzu SPD20MA diode-matrix detector and a Kromasil C-18 separation column. The protein digestibility was measured by sequential exposure to pepsin-trypsin proteinase system under simulated gastric digestion.

Long-time dry aging triggered proteolysis under the action of endogenous enzymes. The electropherogram analysis showed that the proteolytic changes in high-molecular myofibrillar proteins of high-quality beef became more pronounced after a longer maturation period. The distribution of protein fractions by dry aging stages indicated a different rate of degradation of contractile, regulatory, and cytoskeletal proteins. As a result, the structural integrity of muscle fibers degraded, the meat grew tender, and the proteins became more available to digestive enzymes. The amino acid and protein digestibility analyses *in vitro* demonstrated an increase in the nutritional value of beef and the availability of proteins to the action of proteinases after 42 days of dry aging.

Long-term dry aging of high-quality beef increased the digestibility of muscle proteins as a result of proteolysis that accompanied the accumulation of low-molecular fractions. According to the amino acid analysis, the optimal result was most pronounced on day 42 as proven by the moderate oxidative changes in proteins.

Keywords. Meat, beef, dry maturation, proteolysis, protein fractions, amino acids, protein digestibility

Funding. The research was conducted on the premises of the Research Equipment Sharing Center of Kemerovo State University (KemSU), agreement No. 075-15-2021-694, Aug. 5, 2021, between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki) and KemSU (contract identifier RF----2296.61321X0032).

For citation: Gurinovich GV, Patrakova IS, Khrenov VA, Patshina MV, Shevchenko AI. Effect of Dry Aging on Beef Muscle Proteins. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):621–629. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2462>

Введение

Мясо – источник белка высокой биологической ценности, витаминов группы В, минеральных веществ, в частности биодоступного железа, цинка, магния,

селена, и других биологически активных соединений. Поэтому для большинства людей мясо является частью рациона в качестве фактора достижения оптимального роста и развития организма [1, 2].

Пищевая ценность мяса зависит от многих прижизненных факторов и способов технологической обработки и хранения. Один из таких процессов – созревание. Созревание мяса является сложным биохимическим процессом, который происходит под действием эндогенных ферментов и приводит к улучшению его органолептических свойств, включая вкус, аромат и нежность, и увеличению концентрации вкусо-ароматических компонентов в результате потери влаги [3, 4]. Протеолитические ферменты вызывают изменение структуры мышечных волокон и коллагена, образование пептидов и аминокислот. Это повышает доступность мышечных белков действию пищеварительных ферментов, а также пищевую и биологическую ценность мяса [5, 6].

В процессе созревания мышечные белки (преимущественно миофибриллярные) могут подвергаться окислительной деградации, которая определяется как ковалентная модификация белка, индуцируемая активными формами кислорода и побочными продуктами окисления липидов. Это вероятно, т. к. возможности собственной антиоксидантной защиты мяса в послеубойный период снижаются. Физико-химические изменения, вызванные окислением белков, приводят к различным функциональным изменениям, которые, в зависимости от степени их проявления, могут носить желательный или нежелательный характер. Умеренная окислительная модификация способствует упорядоченному межбелковому взаимодействию и улучшению функциональных свойств мяса, в то время как чрезмерное развитие окисления белков может привести к снижению функциональных свойств, нежности мяса и усвояемости белков [7–11]. Окисление белков пищевых продуктов происходит в изменяющихся условиях, поэтому химические модификации и их продукты могут различаться.

Интенсивность и скорость развития послеубойных изменений белков, включая гидролитические и окислительные изменения, будут зависеть от технологии созревания. В исследованиях поясничного отруба мраморной говядины (short loins) установлено, что степень протеолиза белков с накоплением низкомолекулярных продуктов выше при ее выдержке по технологии сухого созревания, чем у традиционного и влажного [12]. С этим согласуются результаты, полученные Y. H. Kim с соавторами и свидетельствующие об увеличении свободных аминокислот как продуктов распада мышечных белков при сухом созревании [13]. В исследовании J. Choe и др. не выявлено различий в белковых профилях баранины сухого и влажного созревания, что обусловлено одинаковой активностью эндогенных ферментов [14].

Исследования взаимосвязи процессов протеолиза и усвояемости белков мяса, в зависимости от технологии созревания, ограничены, а их результаты неоднозначны.

Целью исследования являлось изучение влияния продолжительности сухого созревания высоко-

качественной говядины на белки мышечной ткани и доступность их действию пищеварительных ферментов.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнили на высококачественной говядине от бычков породы герефорд сибирской селекции, откормленных на зерне в течение 12 месяцев на пастбище с доращиванием в течение 180 суток со средней живой массой 540 кг. Убой скота, разделку туш и сухое созревание сырья выполняли в промышленных условиях (д. Уфимцево, Кемеровская область). Качество полутуш оценивали на уровне крестцового позвонка и между 12 и 13 ребрами после охлаждения по совокупности показателей, определенных ГОСТ 33818-2016. Полученное сырье соответствовало второму классу, выход мяса 61 %.

Для созревания взяли костные поясничные отруба, выделенные из задней четвертины. Отруб включает 13-е ребро, он отделен от костреца в месте соединения поясничного и крестцового позвонков разрезом под прямым углом до тазобедренного хряща с отделенными тонким краем пашины и вырезкой.

Для сухого созревания отруба помещали в камеру Dry Aged DX 1000 (Германия) при температуре 0–1 °С, относительной влажности воздуха 74–75 % и скорости движения воздуха 0,5 м/с. Максимальная продолжительность сухой выдержки составила 42 дня. Комбинирование низкой температуры и относительной влажности воздуха направлено на торможение развития микроорганизмов при сухой выдержке.

На рисунке 1 приведен внешний вид образцов, размещенных в камере сухого созревания на разных стадиях. По мере выдержки наблюдаются потемнение мышечной ткани на разрезе, уплотнение внешнего слоя, появление характерного запаха и аромата мяса. Пробы для исследований отбирали из внутренней части отрубов после их зачистки от внешнего слоя, масса образцов 150–200 г. До использования пробы хранили в вакуумной упаковке при температуре –18° С. В ходе исследования контролировали фракционный состав белков и переваримость белков в условиях *in vitro* на начало процесса, а затем на 21, 35 и 42 сутки сухого созревания, а также аминокислотный состав на начало созревания и через 42 сутки выдержки.

Фракционный состав белков определяли методом нативного вертикального электрофореза в пластине ПААГ с использованием камеры Mini-Protean Tetra System. Гель-документирующая система Molecular Imager Gel Doc XR+ (BioRad). Количественный анализ фракций белков выполняли с использованием программного обеспечения Image Lab Software (BioRad). Содержание фракций выражали как массовую долю от общего содержания (%). Маркер белковый форебезе Unstained Protein Standard, Broad Range (10–200 kDa) (BioLabs).

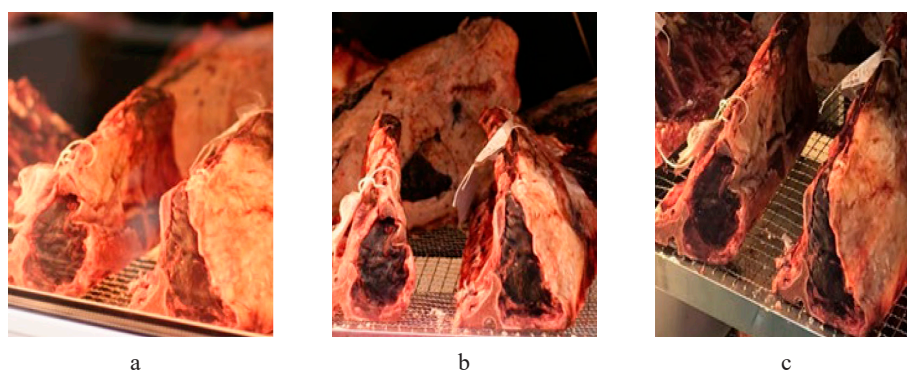


Рисунок 1. Отруба высококачественной говядины сухого созревания через 21 (а), 35 (b) и 42 (с) суток

Figure 1. High-quality beef on dry aging days 21 (a), 35 (b), and 42 (c)

Аминокислотный состав определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием хроматографа жидкостного Shimadzu LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором Shimadzu SPD20MA с разделением аминокислот на колонке Kromasil C-18 250×4,6 мм. Условия проведения: давление 752 мм рт.ст., температура 24 °С, относительная влажность 40 % (МВИ МН 1363-2000. Метод по определению аминокислот в продуктах питания с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии).

Переваримость белков пищеварительными ферментами в опытах *in vitro* устанавливали методом последовательного воздействия на них системой протеаз, включающей пепсин и трипсин, при непрерывном удалении продуктов гидролиза диализом. Количество низкомолекулярных продуктов гидролиза определяли по тирозину [15]. Предварительно образцы (масса $100,0 \pm 0,1$ г) подвергали варке в воде при температуре 85 °С до кулинарной готовности 70 ± 2 °С.

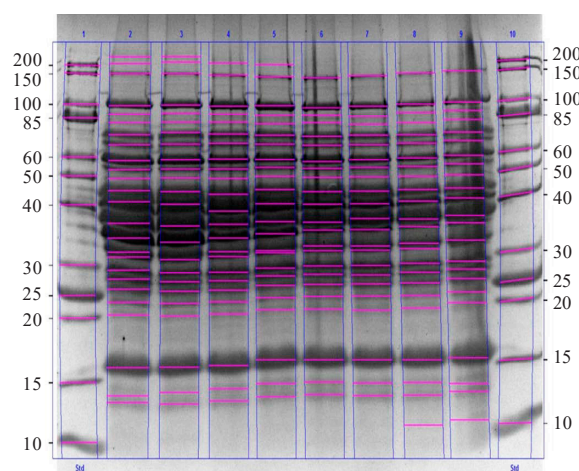
Результаты и их обсуждение

Протеолиз белков – важный фактор, определяющий нежность мяса и степень доступности белков действию пищеварительных ферментов. Электрофореграмма говядины сухого созревания на разных стадиях представлена на рисунке 2, результаты обработки полученных результатов – на рисунке 3.

Согласно полученным данным на начало созревания в исследуемом сырье идентифицированы белки с молекулярной массой 250–200 кДа, которые соответствуют тяжелым цепям миозина и парамиозина [16].

Массовая доля этих фракций составляет 1,0–1,2 %. При исследовании образцов через 21, 35 и 42 суток созревания белки с такой молекулярной массой не идентифицированы, что можно объяснить их распадом.

На всех стадиях контроля в исследуемых образцах выявили фракции белков с молекулярной



1 и 10 – маркеры; 2 и 3 – 1 сутки созревания; 4 и 5 – 21 сутки созревания; 6 и 7 – 35 суток созревания; 8 и 9 – 42 суток созревания

Рисунок 2. Электрофореграмма фракционирования белков говядины сухого созревания

Figure 2. Dry-aged beef protein fractionation: electropherogram

массой 150–100 кДа. Однако с увеличением продолжительности выдержки их количество снижалось с 14,5 % на начало созревания до 6,96 % через 21 сутки созревания, затем до 3,98 и 1,4 % через 35 и 42 суток соответственно. В говядине со сроком сухого созревания 21 сутки преобладали фракции с молекулярной массой около 140 кДа, в говядине со сроком созревания 35 и 42 дня – 130 кДа. Эти фракции следует рассматривать как растворимые продукты распада высокомолекулярных миофибриллярных белков, а также С-белка и актинина, участвующего в образовании поперечных связей между тонкими филаментами миофибрилл [17].

Установлено, что к 35 и 42 суткам созревания увеличилось содержание белковых фракций с молекулярной массой 80–90 кДа, тогда как через 21 сутки массовая доля белков этой фракции была сопос-

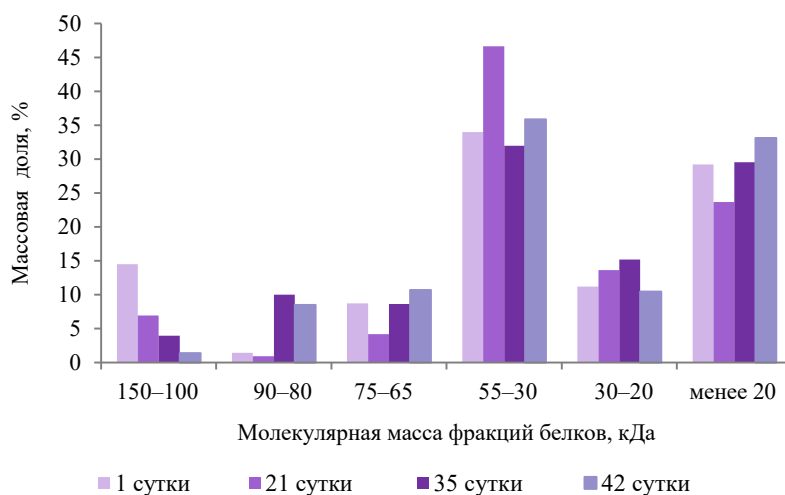


Рисунок 3. Изменение фракционного состава белков высококачественной говядины в процессе сухого созревания

Figure 3. Fractional composition of high-quality beef proteins during dry aging

тавима со значением для сырья, направляемого на созревание. Увеличение количества фракций белков с такой молекулярной массой свидетельствует о протеолитических изменениях в актомиозиновом комплексе с повышением свободных миозина и актина, которые начинают проявляться после длительного сухого созревания, превышающего 21 день.

Увеличение длительности сухого созревания приводит к повышению массовой доли фракций белков с молекулярной массой 65–75 кДа к 42 суткам выдержки. В контролируемые периоды сухого созревания их количество составило 8,71, 4,19, 8,64 и 10,71 % через 21, 35 и 42 сутки соответственно. Значительную долю представляют белковые фракции с молекулярной массой 55–30 кДа, которые могут быть отнесены к белкам тропонин-тропомиозинового комплекса, актину и десмину. Доля фракций белков с данной молекулярной массой составила 37 %, в исследуемые периоды созревания она изменялась незначительно.

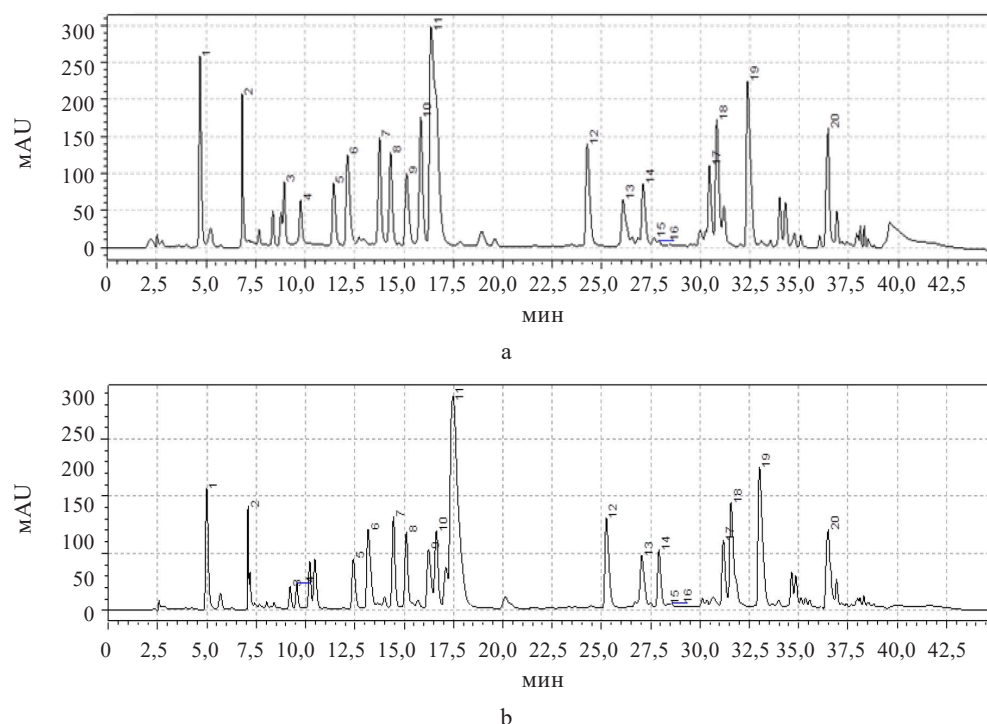
Особенностью электрофореграмм говядины сухого созревания является повышение фрагментов белков с молекулярной массой от 27 до 30 кДа. Их количество для исходного сырья составляет 7,83 %, для сырья со сроком сухого созревания 21, 35 и 42 суток – 12,51, 13,79 и 8,97 % соответственно. Увеличение белков этих фракций относительно исходного сырья оценивается в 1,60, 1,98 и 1,10 раз через 21, 35 и 42 суток сухого созревания соответственно. Появление этих фрагментов можно объяснить изменением регуляторных миофибриллярных белков, в частности тропомиозина и тропонина, с появлением фрагментов Т-тропомина молекулярной массой от 27 до 30 кДа. Снижение доли фракций белков массой 27–30 кДа на более поздних сроках созревания может быть обусловлено их взаимодействием с другими компонентами системы или дальнейшим распадом.

Появление фракций белков в зоне ниже 20 кДа свидетельствует о накоплении низкомолекулярных фрагментов как результата деградации основных мажорных белков, в частности легких цепей миозина. Содержание низкомолекулярных фракций составляет в исходном сырье 29,23 %, в сырье с исследуемыми сроками созревания – 23,66, 29,55 и 33,09 %.

Полученные данные изменения фракционного состава указывают на то, что деградация сократительных и регуляторных белков и белков цитоскелета приходится на разные сроки созревания и сопровождается нарушением структурной целостности мышечных волокон и повышением нежности мяса и доступности их пищеварительным ферментам. При выбранных условиях созревания увеличение доли низкомолекулярных фракций белков высококачественной говядины бычков породы герефорд сибирской селекции происходит при продолжительности сухого созревания более 35 суток, тогда как выдержки в течение 21 суток для этого недостаточно.

Для характеристики биологической ценности белковой составляющей и оценки влияния сухого созревания на степень модификации аминокислот изучили их состав на начало процесса и через 42 дня сухого созревания (рис. 4).

Высококачественная говядина сибирского герефорда – это сырье высокой пищевой ценности. На начало созревания общее содержание незаменимых аминокислот составляет 39,19 г/100 г белка, в эталонном белке оно равно 29,06 г/100 г белка (эталон ФАО/ВОЗ, 2011 г.). Через 42 дня созревания содержание незаменимых аминокислот увеличилось до 43,26 г/100 г белка, что можно объяснить уменьшением массовой доли влаги в созревшем сырье (табл. 1) [18]. В результате определения массовой доли белка установили ее увеличение с 20,8 % на начало созревания до 23,6 % к 42 суткам созревания.



1 – Асп, 2 – Глу, 3 – о-Про, 4 – Сер, 5 – Гли, 6 – Гис, 7 – Арг, 8 – Трп, 9 – Тре, 10 – Ала, 11 – Про, 12 – Тир, 13 – Мет, 14 – Вал, 15 – Цис, 16 – Цис, 17 – Иле, 18 – Лей, 19 – Фен, 20 – Лиз

Рисунок 4. ВЭЖХ хроматограмма анализа состава аминокислот говядины на начало (а) и через 42 дня (б) сухого созревания

Figure 4. Amino acid composition of beef on days 1 (a) and 42 (b) of dry aging: HPLC chromatogram

При оценке аминокислотного состава устанавливали содержание отдельных аминокислот, учитывая их чувствительность к окислению (табл. 1). Из-за высокой реакционной способности тиоловой группы к активным формам кислорода наиболее чувствительными являются метионин и цистеин. Другие аминокислоты, такие как тирозин, гистидин и триптофан, подвержены окислению, но в меньшей степени. Аргинин, пролин и тирозин более устойчивы к окислению. Изменения данных аминокислот вызывают осложненные условия, а именно развитие процесса окисления липидов, катализируемого металлами переменной валентности с образованием гидроксильных радикалов, которые способны взаимодействовать с боковыми группами аминокислот и изменять их [19, 20].

Из данных аминокислотного состава (табл. 1) следует, что в процессе созревания содержание серосодержащих аминокислот цистеина и метионина к 42 суткам созревания уменьшилось с 3,71 до 3,32 г/100 г белка и с 1,58 до 1,34 г/100 г белка соответственно по сравнению с началом сухого созревания. Выявленные различия находятся в пределах погрешности метода. Установлено снижение содержания таких аминокислот, как аргинин и триптофан. Наибольшее снижение содержания выявлено для пролина, тогда как массовая доля гистидина и фенилаланина увеличилась.

Таблица 1. Аминокислотный состав высококачественной говядины сухого созревания

Table 1. Amino acid composition of high-quality dry-aged beef

Аминокислота	Содержание аминокислот, г/100 г белка	
	1 сутки созревания	42 сутки созревания
Аспарагиновая кислота	6,23 ± 1,40	5,68 ± 1,30
Глутаминовая кислота	10,53 ± 2,40	12,98 ± 1,30
Оксипролин	1,32 ± 0,30	0,87 ± 0,20
Серин	1,77 ± 0,40	1,05 ± 0,20
Глицин	2,92 ± 0,60	2,88 ± 0,60
Гистидин	5,01 ± 1,10	5,33 ± 1,20
Аргинин	4,86 ± 1,10	4,66 ± 1,10
Триптофан	1,31 ± 0,30	1,23 ± 0,20
Треонин	4,06 ± 0,90	3,95 ± 0,90
Аланин	6,64 ± 1,50	4,40 ± 1,00
Пролин	5,43 ± 1,20	3,81 ± 0,80
Тирозин	5,08 ± 1,10	5,02 ± 1,10
Метионин	3,71 ± 0,80	3,32 ± 0,70
Цистин	1,58 ± 0,40	1,34 ± 0,30
Валин	3,03 ± 0,70	3,30 ± 0,70
Изолейцин	2,78 ± 0,60	3,72 ± 0,80
Лейцин	5,02 ± 1,00	7,97 ± 1,60
Фенилаланин	7,17 ± 1,60	7,63 ± 1,70
Лизин	5,45 ± 1,20	5,47 ± 1,20
$p < 0,05$		

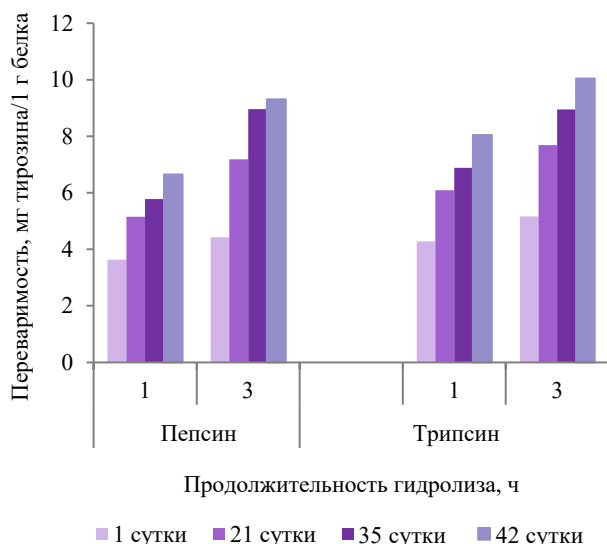


Рисунок 5. Переваримость белков высококачественной говядины в зависимости от степени сухого созревания

Figure 5. Protein digestibility of high-quality beef depending on the degree of dry aging

Из данных аминокислотного состава видно, что степень окислительных изменений белков зависит от условий, в которых находится сырье. Длительное сухое созревание говядины вызывает модификацию белков. Однако можно говорить об умеренности этих изменений, что подтверждают полученные ранее данные [21].

Фрагментация белков с появлением продуктов протеолиза меньшей молекулярной массы и свободных аминокислот приведет к повышению степени их доступности. Модификация аминокислот в результате окисления может вызвать изменение сайтов прикрепления пищеварительных ферментов и снижение доступности белков. Исследования взаимосвязи протеолиза и окисления белков пищевых систем и их доступности действию пищеварительных ферментов ограничены. Имеющиеся научные работы связаны с модельными исследованиями на белках, подвергаемых индуцированному химическому окислению, которое приводит к окислительным изменениям. В качестве примера можно привести модельные исследования переваримости нативного миозина и миозина, подвергнутого индуцированному окислению, которое вызывает выраженную деградацию. Из результатов исследования следует, что миозин, окисленный с образованием поперечных связей между биомолекулами, остается более устойчивым [22]. Исследования М. Morzel и др. с миофибриллярными белками скелетных свиных мышц, предварительно окисленных гидроксильным радикалом (ОН), показали, что модификации аминокислот при окислении могут снижать восприимчивость к гидро-

лазам, в частности к папаину [11]. Биомедицинскими исследованиями установлено, что повышение гидрофобности поверхности белков может усиливать деградацию белка протеазами [23]. Миофибриллы – более сложная система со многими белок-белковыми взаимодействиями, поэтому результаты, полученные на модельных системах, не могут быть в полной мере перенесены на реальные объекты.

В связи с этим был изучен процесс гидролиза белков говядины сухого созревания при последовательном воздействии на них пищеварительных ферментов в условиях *in vitro*, которые имитируют пищеварение в желудочно-кишечном тракте (рис. 5). Пепсин как пищеварительный фермент эффективно расщепляет пептидные связи между гидрофобными и ароматическими аминокислотами, такими как фенилаланин, триптофан и тирозин. Трипсин воздействует на остатки аргинина или лизина на С-конце.

Усвояемость мясных белков зависит от размера и последовательности пептидных сегментов, а также от состава аминокислот после переваривания.

Как следует из полученных данных, степень гидролиза пептидных связей белков пищеварительными ферментами увеличивается с повышением продолжительности выдержки говядины в условиях сухого созревания. Для говядины со сроком сухого созревания 42 дня количество продуктов гидролиза при воздействии пепсина в течение 1 ч увеличилось в 1,83 раза относительно невыдержанного сырья. При более длительном воздействии пепсина (3 ч) относительное увеличение продуктов гидролиза оценивается в 2,1 раза. Таким образом, увеличение экспозиции мышечных белков и фермента приводит к тому, что возможное негативное влияние агрегирования как результата окисления снижается.

Действие пепсина, вызвавшего гидролиз значительного количества пептидных связей, способствует увеличению скорости гидролиза белка под действием трипсина. Общее количество продуктов гидролиза при переваривании высококачественной говядины на начало созревания составило 9,59 мг тирозина/г белка, тогда как через 42 суток созревания оно увеличилось до 16,69 мг тирозина/г белка. Эти данные свидетельствуют о том, что деградация белка на стадии созревания нивелирует последствия молекулярной агрегации, вызванной окислением, которое при сухом созревании носит ограниченный характер [21].

Полученные данные согласуются с исследованием R. Zhang и др., в котором лучшая усвояемость белка говядины ступенчатого созревания в проницаемых пакетах обусловлена развитием ферментативных процессов с образованием низкомолекулярных фрагментов белка и свободных аминокислот и стабилизацией белков за счет ограниченного доступа кислорода [24]. Аналогичные результаты получены в исследовании влияния способов созревания свинины

на протеолиз и переваримость белков, согласно которым сухое созревание в течение 28 суток способствовало повышению количества растворимых пептидов и аминокислот в гидролизате *in vitro* [25]. В работе J.-H. Kim и др. приводятся данные о том, что белки говядины сухого созревания (28 суток), доведенной до кулинарной готовности, усваиваются лучше, чем белки товарной говядины аналогичного способа подготовки, хотя степень окисления и гидрофобность белков созревшей говядины были выше [26].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что длительное сухое созревание до 42 суток способствует повышению пищевой ценности и усвояемости белков высококачественной говядины.

Выводы

Распределение фракций белков по стадиям сухого созревания свидетельствует о разной скорости деградации мышечных белков и степени нарушения структурной целостности мышечных волокон, формирования нежности мяса и доступности белков пищеварительным ферментам. Результаты определения аминокислотного состава и перевариваемости *in vitro* позволяют говорить о повышении доступности белков действию пищеварительных ферментов к 21 суткам сухого созревания

и далее. Полученные результаты свидетельствуют о возможности регулирования качества и пищевой ценности говядины сухого созревания длительностью выдержки.

Критерии авторства

Г. В. Гуринович руководила проектом (0,4). В проведении исследований, обработке данных, написании и корректировке статьи принимали участие все авторы в долях: В. А. Хренов – 0,25, И. С. Патракова – 0,15, М. В. Патшина – 0,15, А. И. Шевченко – 0,05.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

G.V. Gurinovich supervised the project (0.4%). Other authors were responsible for the following shares of experimental studies, data processing, writing, and editing: V.A. Khrenov – 0.25%, I.S. Patrakova – 0.15%, M.V. Patshina – 0.15%, A.I. Shevchenko – 0.05%.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Schöne F, Ibel A, Lorkowski S, Ihling M, Ramminger S, Kirmse R, et al. Composition of pork and German meat products with a focus on iron, selenium and iodine. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;119. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105246>
2. Santos D, Barradas M, Rodríguez-Alcalá LM, Teixeira P, Pintado M. Nutritional profile of beef on the shelves: Influence of production system. *Journal of Food and Agriculture Research*. 2021;1(2):157–179.
3. Sosin-Bzducha E, Puchała M. Effect of breed and aging time on physicochemical and organoleptic quality of beef and its oxidative stability. *Archives Animal Breeding*. 2017;60:191–198. <https://doi.org/10.5194/aab-60-191-2017>
4. Chernukha IM, Akhremko AG. Comparative study of autolytic changes in pork and beef muscle tissue proteome. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2018;3(3):56–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2018-3-3-56-63>
5. Bhat ZF, Morton JD, Mason SL, Bekhit AE-DA. Role of calpain system in meat tenderness: A review. *Food Science and Human Wellness*. 2018;7(3):196–204. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2018.08.002>
6. Shi H, Shahidi F, Wang J, Huang Y, Zou Y, Xu W, et al. Techniques for postmortem tenderisation in meat processing: Effectiveness, application and possible mechanisms. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2021;3. <https://doi.org/10.1186/s43014-021-00062-0>
7. Wang Z, He Z, Gan X, Li H. Interrelationship among ferrous myoglobin, lipid and protein oxidations in rabbit meat during refrigerated and superchilled storage. *Meat Science*. 2018;146:131–139. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.08.006>
8. Zhu X, Ma Z, Zhang X, Huang X, Liu J, Zhuang X. Effect of malondialdehyde-induced oxidation modification on physicochemical changes and gel characteristics of duck myofibrillar proteins. *Gels*. 2022;8(10). <https://doi.org/10.3390/gels8100633>
9. Bao Y, Boeren S, Ertbjerg P. Myofibrillar protein oxidation affects filament charges, aggregation and water-holding. *Meat Science*. 2018;135:102–108. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.09.011>
10. Xiong YL. Muscle protein oxidation and functionality: A global view of a once-neglected phenomenon. *Meat and Muscle Biology*. 2022;5(3). <https://doi.org/10.22175/mmb.14349>
11. Morzel M, Gatellier P, Sayd T, Renner M, Laville E. Chemical oxidation decreases proteolytic susceptibility of skeletal muscle myofibrillar proteins. *Meat Science*. 2006;73(3):536–543. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.02.005>

12. Kim J-H, Kim T-K, Shin D-M, Kim H-W, Kim Y-B, Choi Y-S, *et al.* Comparative effects of dry-aging and wet-aging on physicochemical properties and digestibility of Hanwoo beef. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2020;33(3):501–505. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0031>
13. Kim YHB, Kemp R, Samuelsson LM. Effects of dry-aging on meat quality attributes and metabolite profiles of beef loins. *Meat Science*. 2016;111:168–176. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.09.008>
14. Choe J, Park B, Lee HJ, Jo C. Potential antioxidant and angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity in crust of dry-aged beef. *Scientific Reports*. 2020;10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64861-0>
15. Zhuravskaya NK, Alekhina LT, Otryashenkova LM. Research and quality control of meat and meat products. Moscow: Agropromizdat; 1985. 296 p. (In Russ.). [Журавская Н. К., Алехина Л. Т., Отряшенкова Л. М. Исследование и контроль качества мяса и мясопродуктов. М.: Агропромиздат, 1985. 296 с.]
16. Lisitsyn AB, Ivankin AN, Vostrikova NL, Stanovova IA. Study of the fractional composition of meat proteins during prolonged cold storage. *Vsyo o Myase*. 2014;(2):36–40. (In Russ.). [Изучение фракционного состава белков мяса в процессе длительного холодильного хранения / А. Б. Лисицын [и др.] // Все о мясе. 2014. № 2. С. 36–40.]. <https://www.elibrary.ru/SCSMXL>
17. Grujić R, Savanović D. Analysis of myofibrillar and sarcoplasmic proteins in pork meat by capillary gel electrophoresis. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(2):421–428. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-2-421-428>
18. Hrenov VA, Gurinovich GV, Patrakova IS, Kudryashov LS. Beef quality regulation by dry aging. *Meat Industry*. 2022;(9):24–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37861/2618-8252-2022-09-24-28>
19. Papuc C, Goran GV, Predescu CN, Nicorescu V. Mechanisms of oxidative processes in meat and toxicity induced by postprandial degradation products: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017;16(1):96–123. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12241>
20. Zhang W, Xiao S, Ahn DU. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2013;53(11):1191–1201. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.577540>
21. Gurinovich GV, Hrenov VA, Patrakova IS, Kudryashov LS. Study of the oxidative changes in beef upon dry aging. *Vsyo o Myase*. 2022;(5):54–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-5-54-57>
22. Kamin-Belsky N, Brillon AA, Arav R, Shaklai N. Degradation of myosin by enzymes of the digestive system: Comparison between native and oxidatively cross-linked protein. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1996;44(7):1641–1646. <https://doi.org/10.1021/jf950413x>
23. Davies KJA. Degradation of oxidized proteins by the 20S proteasome. *Biochimie*. 2001;83(3–4):301–310. [https://doi.org/10.1016/s0300-9084\(01\)01250-0](https://doi.org/10.1016/s0300-9084(01)01250-0)
24. Zhang R, Yoo MJY, Farouk MM. Oxidative stability, proteolysis, and *in vitro* digestibility of fresh and long-term frozen stored in-bag dry-aged lean beef. *Food Chemistry*. 2021;344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128601>
25. Vinauskienė R, Surblytė G, Alekšūnas A, Keršienė M, Leskauskaitė D. Effect of traditional and dry package ageing on physicochemical properties and protein digestibility of pork *Longissimus thoracis* muscle. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2022;27. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100487>
26. Kim J-H, Lee H-J, Shin D-M, Kim T-K, Kim Y-B, Choi Y-S. The dry-aging and heating effects on protein characteristics of beef *longissimus dorsi*. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*. 2018;38(5):1101–1108. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.e43>