

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2401>  
<https://elibrary.ru/CHQXOG>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Влияние ионизирующего облучения на пшеничную хлебопекарную муку



А. С. Романов<sup>1</sup>, А. С. Марков<sup>2,\*</sup>, И. Ю. Сергеева<sup>2</sup>,  
Л. А. Козубаева<sup>3</sup>, Д. Н. Протопопов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Международная промышленная академия, Москва, Россия

<sup>2</sup> Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

<sup>3</sup> Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова , Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 16.03.2022

Принята после рецензирования: 19.09.2022

Принята к публикации: 04.10.2022

\*А. С. Марков: [asm041@yandex.ru](mailto:asm041@yandex.ru),

<http://orcid.org/0000-0002-3648-7557>

А. С. Романов: <https://orcid.org/0000-0003-3881-0255>

И. Ю. Сергеева: <https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>

Л. А. Козубаева: <https://orcid.org/0000-0002-5131-4654>

Д. Н. Протопопов: <https://orcid.org/0000-0001-7572-6680>

© А. С. Романов, А. С. Марков, И. Ю. Сергеева,  
Л. А. Козубаева, Д. Н. Протопопов, 2022



### Аннотация.

Радиационная обработка пищевых продуктов применяется для подавления развития микроорганизмов и вредителей. Несмотря на признанную безопасность и сохранение пищевой ценности, исследователи отмечают изменение свойств крахмала и белков в результате данной обработки. Цель работы – изучить влияние ионизирующего облучения на хлебопекарные свойства и показатели безопасности пшеничной муки.

Объектами исследования являлись пшеничная хлебопекарная мука, подвергнутая гамма-облучению дозами от 0 до 47,52 кГр, тесто и хлеб выработанные из нее. Для муки определяли радиационную активность радионуклидов, микробиологические показатели и число падения. Структурно-механические свойства теста исследовали на приборах Alveograf и Mixolab. Качество хлеба оценивали по удельному объему, формоустойчивости и органолептическим показателям.

В работе подтверждена безопасность муки по остаточной энергии гамма-излучения через 24 и 72 ч. При максимальной дозе гамма-облучения отмечали уменьшение КМАФАнМ (в 15 раз) и плесеней (в 5 раз) по сравнению с контролем. Общая энергия деформации, упругие свойства и индекс эластичности теста, определенные по альвеограммам, снизились более чем в два раза, по сравнению с контролем, при максимальной дозе облучения муки. Данные миксолабограмм показали ухудшение устойчивости теста при замесе и снижение температуры начала клейстеризации пшеничного крахмала на 2,3–3,3 °С. Отмечено более чем четырехкратное снижение показателя числа падения, что можно объяснить изменениями состояния пшеничного крахмала. При выпечке хлеба из облученной муки наблюдалось уменьшение удельного объема и формоустойчивости, а при максимальной дозе облучения (47,52 кГр) – потемнение, липкость и заминаемость мякиша.

Исследования показали улучшение микробиологических показателей безопасности пшеничной муки при облучении с максимальной дозой. Было установлено снижение хлебопекарных свойств муки. При дозах свыше 23 кГр ухудшались органолептические и физико-химические показатели качества хлеба, что не позволяет рассматривать ионизирующее облучение пшеничной муки, предназначенной для хлебопечения, как приемлемый способ ее обеззараживания.

**Ключевые слова.** Хлебопечение, радиационная активность, радионуклиды, белок, крахмал, технологические свойства, качество, безопасность

**Для цитирования:** Влияние ионизирующего облучения на пшеничную хлебопекарную муку / А. С. Романов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 729–738. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2401>

## Effect of Ionising Irradiation on Wheat Flour



Aleksandr S. Romanov<sup>1</sup>, Aleksandr S. Markov<sup>2,\*</sup>,  
Irina Yu. Sergeeva<sup>2</sup>, Lyudmila A. Kozubaeva<sup>3</sup>,  
Dmitry N. Protopopov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> International Industrial Academy, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Kemerovo State University<sup>ROR</sup>, Kemerovo, Russia

<sup>3</sup> Polzunov Altai State Technical University<sup>ROR</sup>, Barnaul, Russia

Received: 16.03.2022  
Revised: 19.09.2022  
Accepted: 04.10.2022

\*Aleksandr S. Markov: [asm041@yandex.ru](mailto:asm041@yandex.ru),  
<http://orcid.org/0000-0002-3648-7557>  
Aleksandr S. Romanov: <https://orcid.org/0000-0003-3881-0255>  
Irina Yu. Sergeeva: <https://orcid.org/0000-0002-1686-0131>  
Lyudmila A. Kozubaeva: <https://orcid.org/0000-0002-5131-4654>  
Dmitry N. Protopopov: <https://orcid.org/0000-0001-7572-6680>

© A.S. Romanov, A.S. Markov, I.Yu. Sergeeva,  
L.A. Kozubaeva, D.N. Protopopov, 2022



### Abstract.

Radiation processing suppresses the development of microorganisms and pests in food products. This method is safe and does not affect nutritional value; however, it may change the properties of starch and proteins. The research objective was to define the effect of ionization on the baking properties and safety indicators of wheat flour.

The study featured wheat flour subjected to gamma irradiation at 0–47.52 kGy, as well as dough and bread made from this flour. The flour samples were tested for the radioactivity of radionuclides; a set of experiments revealed their microbiological indicators and falling-number values. The dough samples were studied on an Alveograph and a Mixolab analyzer to define their structural and mechanical properties. The quality of bread was evaluated by its specific volume, shape stability, and sensory profile.

The flour proved safe in terms of residual gamma radiation after 24 and 72 h. At the maximal dose of gamma radiation, the total viable count of mesophyll aerobic and optional-anaerobic microorganisms decreased by fifteen times, whereas the amount of mold decreased by five times. The total strain energy, elastic properties, and elasticity index of the dough declined by more than 50%. The dough had a lower stability during kneading. Its gelatinization onset started earlier by 2.3–3.3°C. The falling number decreased by more than four times, probably, due to the changes in the state of wheat starch. The bread samples had a smaller specific volume and a lower dimensional stability. They also demonstrated signs of darkening, stickiness, and crumb crushing at the maximal irradiation dose (47.52 kGy).

The microbiological safety indicators of wheat flour increased at the maximal irradiation dose. However, the baking properties of flour decreased. The sensory and physicochemical parameters of bread quality started to deteriorate at  $\geq 23$  kGy. Therefore, ionization cannot be recommended as a disinfection method for baking wheat flour production.

**Keywords.** Bakery, radiation activity, radionuclides, protein, starch, technological properties, quality, safety

**For citation:** Romanov AS, Markov AS, Sergeeva IYu, Kozubaeva LA, Protopopov DN. Effect of Ionising Irradiation on Wheat Flour. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):729–738. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2401>

### Введение

Облучение является эффективным и безопасным методом сохранения пищи, поскольку уменьшает порчу, улучшает гигиену питания и продлевает срок годности. Применение облучения пищевых продуктов обсуждается в различных международных

организациях. В последние несколько лет расширилась деятельность по облучению пищевых продуктов в коммерческом масштабе [1, 2].

Существует установленная структура международных стандартов для облучения пищевых продуктов, охватывающих здоровье человека, защиту

растений, маркировку, способы облучения, обеспечение качества и управление объектами. Около 60 стран разрешают облучение одной или нескольких групп продуктов питания. Объемы облученной свежей продукции превышают 20 000 т в год [3, 4].

Результаты исследований доказали, что облучение в установленных стандартами дозах не оказывает отрицательного влияния на питание или остаточную радиацию в пище [5, 6].

Технологии радиационной обработки показывают потенциал для будущих применений, прежде всего в направлении обеззараживания пищевой продукции [7–10].

Несмотря на имеющийся опыт применения данной технологии обработки, проводятся исследования по установлению влияния радиационной обработки пищевых продуктов как на показатели пищевой ценности, так и на отдельные компоненты таких систем. Главным фактором во всех исследованиях является доза облучения.

Общая доза облучения в 10 кГр эффективна для микробной дезактивации зерен зерновых культур и не оказывает негативного влияния на их пищевое качество [11]. Есть научные работы по изучению влияния малых доз гамма-облучения с последующим хранением на физико-химические свойства зерна пшеницы. Гамма-облучение до 3,5 кГр ингибировало некоторые группы грибной популяции микроорганизмов, но не влияло на физические свойства зерен пшеницы. При дозах облучения 0,5, 1,5, 2,5 и 3,5 кГр потери для всех незаменимых аминокислот находились в диапазоне от 0,56 до 1,62 %, для общего количества всех аминокислот – в диапазоне от 0,03 до 0,28 %. Общая потеря заменимых аминокислот увеличивается в диапазоне от 0,22 до 0,45 % при тех же дозах облучения. Большие потери лизина отмечены для всей облученной пшеницы. Так как аминокислота лизин является ограничивающей в большинстве зерновых, то уменьшение от облучения понизило их питательную ценность [12].

Радиационная обработка может оказывать влияние на основные компоненты растительных сельскохозяйственных продуктов. Исследованиям подвергаются различные компоненты. Например, исследовано влияние гамма-облучения на основные фенольные соединения в зернах риса трех генотипов (черного, красного и белого). Гамма-облучение в большинстве доз может уменьшить полное содержание фенольных кислот. Однако можно говорить о сложном воздействии на отдельные компоненты. Установлено, что доза облучения 6 и 8 кГр увеличила общее содержание антоцианов и фенольных кислот в черном рисе [13, 14]. Наиболее полно изучено влияние облучения на свойства крахмала различных злаков. Подтверждено влияние гамма-облучения на физико-химические, реологические и термические свойства крахмала различных злаков [15–20].

С помощью методов термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии установлено влияние гамма-излучения на микроструктуру зерна риса и свойства его крахмала [21]. Установлено деструктивное действие облучения на биополимеры с высокой молекулярной массой. На основе гелевой хроматографии крахмала белого риса установлено, что отношение содержания амилопектина к амилозе уменьшалось с увеличением дозы облучения [22].

Изучено влияние гамма-излучения (3, 5, 10, 20, 35 и 50 кГр) на структурные, термические, физико-химические, морфологические и реологические свойства пшеничного крахмала. Подтверждено наличие свободных радикалов после гамма-лучевой обработки, число которых со временем уменьшалось. Дифференциальные сканирующие калориметрические термограммы показали отсутствие существенных различий температур клейстеризации, а также соответствующих энтальпий перехода. Видимое содержание амилозы линейно уменьшалось с увеличением дозы облучения, что приводило к увеличению индекса растворимости в воде. Увеличение скорости набухания наблюдалось после облучения до 20 кГр. Микроскопические наблюдения показали, что влияние гамма-излучения было более заметным на крахмальные клейстеры, чем на крахмальные гранулы. Реологические свойства крахмальных клейстеров снижались с увеличением дозы облучения в результате расщепления гликозидных связей [23].

Описано влияние гамма-облучения на физико-химические, тепловые и функциональные свойства цельной пшеничной муки и выделенного после облучения крахмала. Результаты показали, что состав основных пищевых веществ не менялся с дозировкой, но содержание амилозы возросло с 25,33 до 36,03 %. Насыпная плотность муки существенно не изменилась. Набухаемость, растворимость, синерезис и стабильность при оттаивании и замораживании были улучшены при повышении дозы [24].

Интерес представляют исследования влияния облучения на различные комплексные и технологические свойства муки, т. к. это позволяет судить о применимости такого продукта для дальнейшей переработки, что особенно важно для муки [24, 25]. Основной целью облучения является снижение содержания микроорганизмов и обеззараживание. Как показывают различные исследования, эти изменения зависят от величины дозы облучения.

Исследование влияние низко-дозового гамма-облучения (0,25–1,00 кГр) на фасованную цельно-зерновую муку показало, что не было отрицательного влияния облучения и хранения до 6 месяцев на общие белки, жиры, углеводы, содержание витаминов В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub>, индекс цвета, значение седиментирования,

свойства теста и общее количество бактерий и плесеней. Хранение пшеничной муки привело к увеличению влажности, свободных жирных кислот и поврежденного крахмала, а также к снижению сахаров и вязкости клейстеризации. Однако облучение не оказало влияния ни на один из этих параметров. Облучение при 0,25 кГр было достаточным для сохранения свойств муки в течение 6 месяцев без каких-либо существенных изменений в питательных и функциональных свойствах [26].

В диапазоне доз 1–5 кГр облучение не оказывало существенного влияния на основной питательный состав и аминокислотное содержание пшеничной муки. Содержание сырой клейковины и влажность клейковины в пшеничной муке существенно не изменялись, но индекс клейковины и число падения снижались с увеличением дозы облучения. Облучение смогло увеличить скорость поглощения воды пшеничной мукой и уменьшить время образования теста и время стабильности. С увеличением дозы облучения площадь растяжения, сопротивление растяжению, коэффициент растяжения и другие параметры сначала увеличивались, а затем уменьшались, но величины этих изменений не были значительными [27].

Исследовано влияние гамма-излучения на физико-химические свойства образцов цельной пшеничной муки. Три сорта пшеницы подвергали гамма-облучению в дозах 2,5 и 5 кГр. Результаты выявили снижение поглощения воды и масла, набухаемости и эмульсионной способности всех исследуемых сортов. При облучении было обнаружено увеличение индекса растворимости в воде, стабильности эмульсии, пенообразующей способности и стабильности. Вязкость клейстеров также снижается при облучении [28].

При гамма-облучении пшеничной цельнозерновой муки дозами до 10 кГр изменялись ее тепловые, реологические и функциональные свойства. Время образования теста уменьшалось, но формирование каких-либо новых химических групп не наблюдалось [29].

Установлено влияние гамма-излучения в дозах до 9 кГр на некоторые технологические характеристики пшеничной муки и физические свойства хлебобулочных изделий, приготовленных из этой муки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что обработка пшеничной муки ионизирующим излучением может повышать ферментативную активность в процессе хлебопечения и увеличивать массу, высоту и усилия деформации выпекаемого из нее хлеба в зависимости от дозы облучения [30].

Несмотря на доступные результаты исследований, отсутствуют данные, позволяющие судить об изменении хлебопекарных свойств муки в результате гамма-облучения при дозах, влияющих на содержание микроорганизмов.

### Объекты и методы исследования

В работе использовали пшеничную хлебопекарную муку 1 сорта с массовой долей золы в пересчете на сухое вещество не более 0,75 %, отвечающую требованиям ГОСТ 26574-2017.

Облучение образцов проводили на гамма-установке РХМ-У-20. Мощность дозы гамма-излучения была определена с помощью ферросульфатной дозиметрии. Радиационно-химический выход  $\text{Fe}^{3+}$  принимали равным 15,6 ( $100 \text{ эВ}^{-1}$ ). Максимальная энергия гамма-излучения – 1,25 МэВ. Для определения поглощенной дозы в качестве дозиметрической системы использовали твердый нитрат калия. Радиационно-химический выход нитрит ионов принимали равным 1,57 ( $100 \text{ эВ}^{-1}$ ). В процессе проведения исследования мощность поглощенной дозы была равна 1,1 Гр/с.

О влиянии гамма-облучения на свойства муки судили по радиационной активности радионуклидов, состоянию микрофлоры, структурно-механическим свойствам теста и качеству хлеба.

Измерение удельной активности цезия-137 в образцах муки проводили на сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс» с блоком детектирования в свинцовой защите.

Определение остаточной энергии гамма-излучения в муке проводили на лабораторной установке, состоящей из свинцовой измерительной камеры с толщиной стенок 50 мм, сцинтилляционного детектора БДЭГ4-43А с диаметром кристалла 63 мм, аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением.

Определение в муке количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), плесеней и *Bacillus subtilis* проводили методами, основанными на высеве продукта, инкубировании посевов и подсчете всех выросших видимых колоний.

Число падения определяли на приборе Falling Number (Perten Instruments, Швеция), реологические свойства теста – с применением приборов Alveograf и Mixolab (CHOPIN Technologies, Франция).

Определение реологических свойств с применением Альвеографа основано на установлении усилия на раздувание воздухом образца теста в виде шара. Данный процесс воспроизводит деформацию теста под воздействием углекислого газа, накапливающегося в процессе брожения теста. С помощью альвеограмм определяют реологические характеристики теста:  $P$  – максимальное избыточное давление (характеризует упругость),  $L$  – среднюю абсциссу при разрыве (характеризует растяжимость),  $W$  – общую энергию деформации (характеризует «хлебопекарную силу» муки),  $P/L$  – соотношение упругости и растяжимости,  $G$  – индекс раздувания,  $I.e.$  – индекс эластичности.

Основными параметрами теста, определяемыми с помощью миксолаба, являются:

- консистенция, т. е. сопротивление теста, оказываемое месильным лопастям прибора Миксолаб при постоянной частоте вращения 80 об/мин и выраженное через момент силы ( $H \cdot m$ ), измеряемый на приводе месильных лопастей;
- водопоглощение (water absorption), т. е. объем воды, необходимый для образования теста заданной консистенции, создающей максимальный момент силы ( $C1$ ), равный 1,1  $H \cdot m$ ;
- время образования теста (time), т. е. время, необходимое для образования теста с заданной консистенцией, создающей момент силы, равный 1,1  $H \cdot m$ ;
- стабильность (stability), т. е. время, в течение которого тесто сохраняет консистенцию, создающую момент силы выше или равный 1,1  $H \cdot m$ .

Для изучения влияния ионизирующего облучения муки на качество хлеба проводили лабораторные выпечки. Тесто готовили однофазным (безопарным) способом. Тесто замешивали из муки, пресованных хлебопекарных дрожжей, соли и воды. Брожение теста проводили при температуре 28–30 °С в течение 210 мин. Сформованные тестовые заготовки после расстойки выпекали при температуре 210–220 °С в течение 15–20 мин в увлажненной пекарной камере. Качество хлеба определяли по органолептическим и физико-химическим показателям общепринятыми методами.

### Результаты и их обсуждение

**Показатели безопасности.** Важным показателем безопасности продукта, подвергнутого обработке гамма-лучами, является величина его собственного радиационного фона. При определении остаточной энергии гамма-излучения образцов муки каждое измерение проводили в течение 1000 с. Анализ проводили через 24 и 72 ч после облучения. Естественный радиационный фон в лаборатории составлял 265,9 Бк. Радиационная активность внутри пустой свинцовой камеры была равна 26,8 Бк.

Результаты определения остаточной активности образцов муки, подвергнутых облучению, представлены в таблице 1.

Разница в результатах измерения радиационной активности образцов муки с различной дозой облучения не превышала 1,5 %, что сопоставимо с

погрешностью прибора. Кроме того, радиационный фон образцов муки был почти в 10 раз меньше естественного фона в помещении лаборатории.

Облучение муки не влияло на содержание в ней радионуклидов. При дозе облучения муки до 47,52 кГр удельная активность цезия-137 во всех образцах оставалась на одном уровне и не превышала 6,0 Бк/кг. Допустимое значение, нормируемое ГОСТ 32161-2013, составляет не более 60 Бк/кг.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что облучение муки гамма-лучами не влияет на ее остаточную радиоактивность, что согласуется с данными других авторов [5, 6].

Многочисленные данные научно-технической литературы указывают на то, что чувствительность микроорганизмов к действию облучения зависит от его дозы. Проведенные исследования микробиологических показателей исследуемых облученных образцов муки показали аналогичную тенденцию. Количество колоний *Bacillus subtilis* и КМАФАнМ при дозах до 23,76 кГр существенно не изменялось. Однако при максимальной дозе гамма-облучения количество колоний КМАФАнМ уменьшалось, по сравнению с контролем, в 15 раз, плесеней – в 5 раз.

**Структурно-механические свойства.** Облучение влияло на свойства муки и теста из нее. Изучение структурно-реологических свойств теста выявило изменение белково-протеиназного и углеводно-амилазного комплексов пшеничной муки.

Особенности полученных альвеограмм и результаты их обработки (табл. 2) иллюстрируют изменение упруго-эластичных свойств теста в результате облучения муки.

Общая энергия деформации ( $W$ ), упругие свойства ( $P$ ) и индекс эластичности теста при максимальной дозе облучения муки уменьшались более чем в два раза по сравнению с контрольным образцом.

Наблюдаемое снижение величины избыточного давления  $P$  обусловлено снижением сопротивления теста деформации. Снижение упругих и эластичных свойств теста приводило к ухудшению хлебопекарной силы муки, отражающейся в показателе энергии деформации ( $W$ ).

Полученные данные вызваны изменениями состояния белковых веществ теста, формирующих его упруго-эластичные свойства. Это косвенно подтверждается данными других исследований, указывающих на изменение содержания аминокислот и влияние на белки [12].

Для изучения водопоглощения муки и реологических свойств теста в процессе замеса использовали прибор Миксолаб (Chopin Mixolab).

Сущность метода заключается в измерении момента силы ( $H \cdot m$ ), возникающего на приводе месильных лопастей при замесе теста из муки и воды в тестомесилке, температура которой меняется

Таблица 1. Остаточная энергия гамма-излучения муки

Table 1. Residual gamma radiation of flour

Доза облучения, кГр	Остаточная энергия излучения, Бк
0 (контроль)	26,963
11,88	26,911
23,76	27,135
47,52	27,358

Таблица 2. Показатели альвеограмм муки при различной дозе облучения

Table 2. Alveograms of flour at different radiation doses

Показатель	Значения показателей при дозе облучения, кГр			
	0	11,88	23,76	47,52
Энергия деформации ( $W$ ), Дж	283	221	171	103
Максимальное избыточное давление ( $P$ ), мм водн. ст.	135	122	93	77
Средняя абсцисса при разрыве ( $L$ ), мм	57	49	66	42
Индекс раздувания ( $G$ )	16,8	15,6	18,1	14,4
Отношение $P/L$	2,37	2,49	1,41	1,83
Индекс эластичности ( $I.e.$ )	50,9	44,7	33,6	17,6

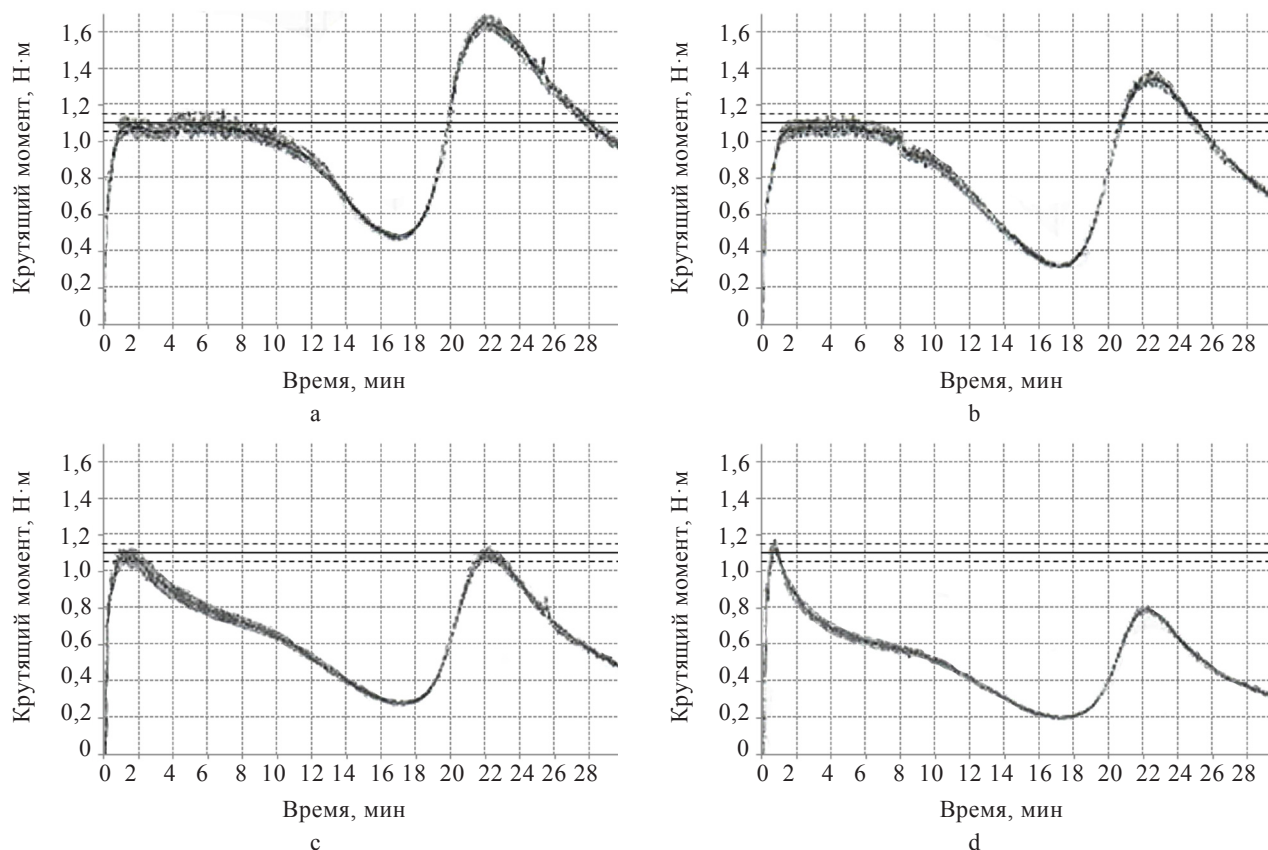


Рисунок 1. Миксолабограммы муки при различной дозе гамма-облучения: а – 0 кГр (контроль); б – 11,88 кГр; в – 23,76 кГр; д – 47,52 кГр

Figure 1. Mixolabograms of flour at different gamma-irradiation doses: a – 0 kGy (control); b – 11.88 kGy; c – 23.76 kGy; d – 47.52 kGy

по определенному алгоритму, включенному в программное обеспечение прибора.

Результаты определения выражали в числовом и графическом виде. График изменения момента силы (крутящего момента) в процессе замеса при различных температурных режимах, называемый миксолабограммой, имеет несколько критических точек (C1, C2, C3, C4, C5), соответствующих фазам состояния компонентов теста.

Представленные миксолабограммы (рис. 1) иллюстрируют изменения водопоглощения муки

и реологических свойств теста в зависимости от условий замеса и повышения температуры.

Во время первой фазы проводили замес, обеспечивающий достижение тестом максимальной консистенции и затем ее снижение. В течение 8 мин температура теста и тестомесилки поддерживалась на уровне 30 °С. На этой фазе определяли водопоглощение при достижении значения консистенции теста, равного  $1,10 \pm 0,05$  Н·м. Облучение муки приводило к сокращению времени образования теста и снижению его стабильности – времени, в течение

Таблица 3. Данные миксолабограмм в точке С1

Table 3. Mixolabogram data at point C1

Доза облучения, кГр	Водопоглощение, %	Время, мин	Стабильность, мин
0 (контроль)	60,1	4,55	10,62
11,88	62,7	4,53	7,47
23,76	63,1	1,18	3,15
47,52	67,7	0,08	1,03

Таблица 4. Данные миксолабограмм в точке С2

Table 4. Mixolabogram data at point C2

Доза облучения, кГр	Момент силы, Н·м	Температура теста, °С
0 (контроль)	0,48	55,6
11,88	0,33	53,3
23,76	0,28	53,2
47,52	0,21	52,3

Таблица 5. Данные миксолабограмм в точке С3

Table 5. Mixolabogram data at point C3

Доза облучения, кГр	Момент силы, Н·м	Температура теста, °С
0 (контроль)	1,63	75,8
11,88	1,34	73,0
23,76	1,10	72,3
47,52	0,79	71,6

которого тесто сохраняет консистенцию, создающую момент силы выше или равный 1,1 Н·м (табл. 3).

Время достижения заданной консистенции 1,1 Н·м (С1) снижалось с 4,55 мин в контрольном образце до 0,08 мин в образце с дозой облучения 47,52 кГр (табл. 4). Одновременно снижался показатель стабильности, что свидетельствовало об ухудшении устойчивости теста при замесе. Чем больше была доза облучения муки, тем более коротким был период стабильности теста. При дозе облучения муки более 11,88 кГр через 3,15 мин после достижения максимального значения момента силы тесто начинало разжижаться. При дозе облучения муки 47,52 кГр период стабильности практически отсутствовал.

В отличие от контрольного в опытных образцах разжижение теста начиналось до контролируемого повышения температуры в месилке Миксолаба.

После первой фазы, в которой замес проводят при температуре 30 °С в течение 8 мин, температуру в месилке приборы плавно повышают с 30 до 90 °С. Происходит снижение значения момента силы, означающее разжижение теста. Достижение минимального значения момента силы (точка С2) означает конец фазы разжижения (фазы 2).

В фазе разжижения образцов теста из облученной муки наблюдали снижение как минимального значения момента силы (с 0,48 до 0,21 Н·м), так и температуры теста (с 55,6 до 52,3 °С), при которой достигалось это значение (табл. 4).

В контрольном образце момент силы в точке С2 был в два раза больше, чем в образце с максимальной дозой облучения.

Разжижение теста под действием механического воздействия при замесе обусловлено свойствами белков. Гамма-облучение муки вызывает разруше-

ние внутри- и межмолекулярных связей в белковых образованиях теста. Это приводит к снижению энергии, необходимой для деградации клейковинного каркаса теста и расслаблению структуры теста.

Полученные результаты согласуются с приведенными выше данными, полученными с помощью Альвеографа.

После достижения минимальной консистенции в точке С2 значение момента силы начинает увеличиваться, достигая максимального значения в точке С3 (фаза 3). Увеличение момента силы обусловлено тем, что под воздействием высокой температуры происходит разрушение гранул крахмала, а также повышение водопоглощения и консистенции теста. Данная фаза характеризует свойства крахмала и амилолитическую активность муки. Температура теста в точке С2 соответствует температуре начала клейстеризации крахмала.

Сравнительный анализ данных миксолабограмм показывает, что гамма-облучение муки приводило к снижению температуры начала клейстеризации пшеничного крахмала. Температура теста при достижении минимальной консистенции в точке С2 в контрольном образце была на 2,3–3,3 °С выше, чем в опытных образцах.

Фаза 3 имитирует изменения, происходящие в тесте в процессе выпечки. Консистенция теста по завершении фазы 3 характеризуется значениями момента силы и температуры теста. Из данных миксолабограмм видно, что в тесте из муки, обработанной гамма-излучением, значения моменты силы в конце прогрева (точка С3) были на 18–52 % ниже, чем у контрольного образца (табл. 5). В пробе с максимальной дозой облучения 47,52 кГр момент силы был ниже значения 1,1 Н·м – значения в точке С1.

Таблица 6. Влияние облучения муки на качество хлеба из пшеничной муки 1 сорта

Table 6. Effect of wheat flour irradiation on bread quality

Доза облучения, кГр	Удельный объем, см <sup>3</sup> /г	Формоустойчивость (Н/Д)	Цвет и состояние мякша
0 (контроль)	3,10	0,56	Светлый, сухой на ощупь
11,88	3,07	0,55	Светлый с сероватым оттенком, сухой на ощупь
23,76	2,66	0,43	Светлый с коричневым оттенком, заминающийся
47,52	2,45	0,34	Темный с коричневым оттенком, влажный на ощупь, заминающийся

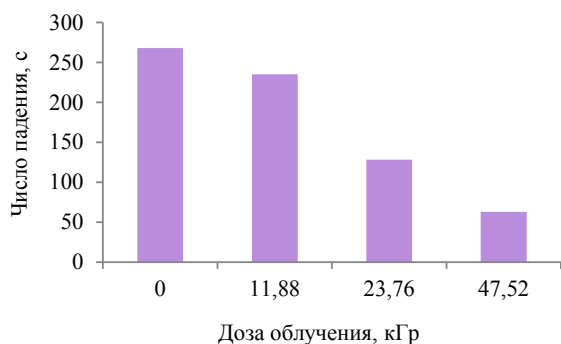


Рисунок 2. Зависимость числа падения от дозы облучения

Figure 2. Effect of radiation dose on falling-number value

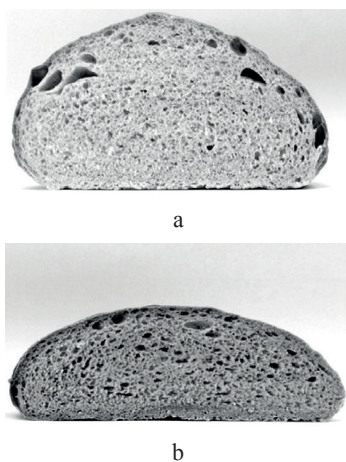


Рисунок 3. Внешний вид подового хлеба при дозе облучения муки: а – 0 кГр (контроль); б – 47,52 кГр

Figure 3. Bread at different flour irradiation doses: а – 0 kGy (control); б – 47.52 kGy

Данные, полученные с помощью Миксолаба, согласуются с результатами определения числа падения (рис. 2).

Увеличение дозы облучения с 11,88 до 47,52 кГр вызывало снижение показателя числа падения почти в четыре раза – с 235 до 63 с. Число падения характеризует процесс разжижения клейстеризо-

ванного крахмала под действием амилаз. Снижение температуры клейстеризации крахмала и момента силы в точках С2 и С3 на миксолабограммах и уменьшение числа падения объясняются изменениями состояния пшеничного крахмала, вызванными гамма-излучением, на что указывают другие авторы [21, 23].

**Качество хлеба.** Изменения белков и крахмала муки, вызванные ионизирующим облучением, влияли не только на свойства теста, но и на качество хлеба. Для изучения влияния ионизирующего облучения муки на качество хлеба проводили лабораторные выпечки. Результаты анализа качества хлеба приведены в таблице 6.

Наибольшее влияние обработка муки гамма-излучением оказывала на объем, формоустойчивость и цвет мякша хлеба. Все наблюдаемые изменения качества хлеба из облученных образцов муки носили негативный характер.

С увеличением дозы облучения муки до 47,52 кГр удельный объем формового хлеба уменьшался на 21 %, а формоустойчивость подового хлеба на 39 %. Цвет мякша становился более темным, что наглядно проявлялось в хлебе из муки с дозой облучения 47,52 кГр (рис. 3). У данного образца мякш хлеба был липким на ощупь и заминающимся, а у нижней корки появлялся закал.

### Выводы

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов о влиянии облучения пшеничной муки гамма-лучами в дозах 11,88–47,52 кГр:

1. Облучение не оказывает влияния на активность цезия-137 и на остаточную радиационную активность;

2. Под воздействием гамма-лучей снижается количество КМАФАнМ и плесеней в муке;

3. Гамма-облучение оказывает деструктивное влияние на биополимеры муки – белки и крахмал. Это вызывает снижение общей энергии деформации и консистенции теста, сокращение стабильности теста при замесе, уменьшение температуры начала клейстеризации крахмала и снижение числа падения;

4. Гамма-облучение пшеничной муки в дозах свыше 23 кГр ухудшает органолептические и физико-химические показатели качества хлеба.



### Критерии авторства

А. С. Романов и А. С. Марков – аналитический обзор литературы, методология и организация исследования, написание и общая редакция рукописи. И. Ю. Сергеева – обеспечение финансирования проекта. Л. А. Козубаева и Д. Н. Протопопов – проведение исследования, первичная обработка экспериментальных данных.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution

A.S. Romanov and A.S. Markov reviewed the related scientific publications, developed the methodology, and organized the research, as well as wrote and proofread the manuscript. I.Yu. Sergeeva was responsible for funding. L.A. Kozubaeva and D.N. Protopopov conducted the research and performed the primary processing of the experimental data.

### Conflict of interest

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

### References/Список литературы

1. Ihsanullah I, Rashid A. Current activities in food irradiation as a sanitary and phytosanitary treatment in the Asia and the Pacific Region and a comparison with advanced countries. *Food Control*. 2017;72:345–359. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.03.011>
2. Indiarito R, Pratama AW, Sari TI, Theodora HC. Food irradiation technology: A review of the uses and their capabilities. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2020;68(12):91–98. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V68I12P216>
3. Ic E, Cetinkaya N. Food safety and irradiation related sanitary and phytosanitary approaches – Chinese perspective. *Radiation Physics and Chemistry*. 2021;181. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109324>
4. Varalakshmi S. A review on the application and safety of non-thermal techniques on fresh produce and their products. *LWT*. 2021;149. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111849>
5. Munir MT, Federighi M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations. *Foods*. 2020;9(7). <https://doi.org/10.3390/foods9070878>
6. Feliciano CP. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018;144:34–36. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.010>
7. Pankaj SK, Shi H, Keener KM. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food. *Trends in Food Science and Technology*. 2018;71:73–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.007>
8. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV, Gorlov IF. Effect of various doses of ionizing radiation on the safety of meat semi-finished products. *Foods and Raw Materials*. 2018;6(1):120–127. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-120-127>
9. Gaynutdinov TR. Experimental selection of doses of ionizing radiation causing growth inhibition and full inactivation of golden stafilokok. *Veterinary Vrach*. 2020;(4):4–8. (In Russ.). [Гайнутдинов Т. Р. Экспериментальный подбор доз ионизирующего излучения, вызывающих ингибирование роста и полную инактивацию золотистого стафилококка // Ветеринарный врач. 2020. № 4. С. 4–8.]
10. Piskaeva AI, Sidorin YuYu, Dyshlyuk LS, Zhumaev YuV, Prosekov AYu. Research on the influence of silver clusters on decomposer microorganisms and E. coli bacteria. *Foods and Raw Materials*. 2014;2(1):620–66. <https://doi.org/10.12737/4136>
11. Paul A, Radhakrishnan M, Anandakumar S, Shanmugasundaram S, Anandharamakrishnan C. Disinfestation techniques for major cereals: A status report. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020;19(3):1125–1155. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12555>
12. Schmidt M, Zannini E, Arendt EK. Recent advances in physical post-harvest treatments for shelf-life extension of cereal crops. *Foods*. 2018;7(4). <https://doi.org/10.3390/foods7040045>
13. Ito VC, Zielinski AAF, Demiate IM, Spoto M, Nogueira A, Lacerda LG. Gamma radiation effects on physicochemical, microbiological and antioxidant properties of black rice (*Oryza Sativa* L.) flour during storage. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*. 2019;11(3):163–174. <https://doi.org/10.34302/crpfjst/2019.11.3.14>
14. Sultan N, Wani IA, Masoodi FA. Moisture mediated effects of  $\gamma$ -irradiation on physicochemical, functional, and antioxidant properties of pigmented brown rice (*Oryza sativa* L.) flour. *Journal of Cereal Science*. 2018;79:399–407. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.10.020>
15. Sunder M, Mumbreakar KD, Mazumder N. Gamma radiation as a modifier of starch – Physicochemical perspective. *Current Research in Food Science*. 2022;5:141–149. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.01.001>
16. Mukhtar R, Shah A, Noor N, Gani A, Wani IA, Ashwar BA.  $\gamma$ -Irradiation of oat grain – Effect on physicochemical, structural, thermal, and antioxidant properties of extracted starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017;104:1313–1320. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.092>

17. Polesi LF, Sarmiento SBS, Canniatti-Brazaca SG. Starch digestibility and functional properties of rice starch subjected to gamma radiation. *Rice Science*. 2018;25(1):42–51. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2017.08.003>
18. Kumar P, Prakash KS, Jan K, Swer TL, Jan S, Verma R, et al. Effects of gamma irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of brown rice starch. *Journal of Cereal Science*. 2017;77:194–200. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.08.017>
19. Lee N-Y, Kim J-K. Effects of gamma radiation on the physicochemical properties of brown rice and changes in the quality of porridge. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018;152:89–92. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.07.021>
20. Dar MZ, Deepika K, Jan K, Swer TL, Kumar P, Verma R, et al. Modification of structure and physicochemical properties of buckwheat and oat starch by  $\gamma$ -irradiation. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018;108:1348–1356. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.067>
21. Ito VC, Bet CD, Wojcicchowski JP, Demiate IM, Spoto MHF, Schnitzler E, et al. Effects of gamma radiation on the thermoanalytical, structural and pasting properties of black rice (*Oryza sativa* L.) flour. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018;133(1):529–537. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6766-6>
22. Polesi LF, Junior MDM, Sarmiento SBS, Canniatti-Brazaca SG. Starch digestibility and physicochemical and cooking properties of irradiated rice grains. *Rice Science*. 2017;24(1):48–55. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.07.005>
23. Atrous H, Benbettaieb N, Chouaibi M, Attia H, Ghorbel D. Changes in wheat and potato starches induced by gamma irradiation: A comparative macro and microscopic study. *International Journal of Food Properties*. 2017;20(7):1532–1546. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1213740>
24. Bashir K, Swer TL, Prakash KS, Aggarwal M. Physico-chemical and functional properties of gamma irradiated whole wheat flour and starch. *LWT*. 2017;76:131–139. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.050>
25. Bhat NA, Wani IA, Hamdani AM, Masoodi FA. Effect of gamma-irradiation on the thermal, rheological and antioxidant properties of three wheat cultivars grown in temperate Indian climate. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;176. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108953>
26. Ansari F, Homayouni A, Mohsennezhad P, Alivand AM, Pourjafar H. Extending the shelf-life of whole-wheat flour by gamma irradiation and organoleptic characteristics of cakes made with irradiated flour. *Current Nutrition and Food Science*. 2020;16(5):757–762. <https://doi.org/10.2174/1573401315666190115161626>
27. Wei H-H, Luo X-H, Wang L, Li Y-F, Li Y-N, Wang R, et al. Effect of electron beam irradiation on the sterilization, quality, and bacterial count of wheat flour. *Modern Food Science and Technology*. 2017;33(2):142–147. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.2.022>
28. Manupriya BR, Lathika, Somashekarappa HM, Patil SL, Shenoy KB. Study of gamma irradiation effects on the physico-chemical properties of wheat flour (*Triticum aestivum*, L.). *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;172. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108693>
29. Bashir K, Jan K, Aggarwal M. Thermo-rheological and functional properties of gamma-irradiated wholewheat flour. *International Journal of Food Science and Technology*. 2017;52(4):927–935. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13356>
30. Bhat NA, Wani IA, Hamdani AM, Masoodi FA. Effect of gamma-irradiation on the thermal, rheological and antioxidant properties of three wheat cultivars grown in temperate Indian climate. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;176. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108953>