



Изменение всхожести, содержания протеина и клейковины в зерновках твердой и мягкой пшеницы после действия импульсного давления и длительного хранения

Я.И. Храмова*, Е.Э. Нефедьева✉*, С.Л. Белопухов**,

И.И. Дмитриевская**, В.Н. Храмова*

*Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация

**Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Целью представленного исследования являлось выявление особенностей старения зерновок твердой и мягкой пшеницы без обработки и после обработки их импульсным давлением, создаваемым ударной волной. Зерно обрабатывали импульсным давлением 11 и 29 МПа. Через один месяц и через три года зерновки были отсортированы на стекловидные и мучнистые. Всхожесть контрольных зерновок мягкой пшеницы после хранения снизилась, а после обработки импульсным давлением и хранения она превышала контроль. Всхожесть контрольных зерновок твердой пшеницы с мучнистым эндоспермом после хранения снизилась в большей степени, чем зерновок со стекловидным эндоспермом. Обработка импульсным давлением привела к снижению всхожести зерновок со стекловидным эндоспермом. В зерновках твердой пшеницы в контроле содержание протеина после длительного хранения не изменилось. Импульсное давление способствовало снижению содержания протеина при хранении. У зерновок мягкой пшеницы содержание протеина после хранения снизилось в зерновках с мучнистым эндоспермом. Обработка импульсным давлением способствовала лучшему сохранению протеина в этих зерновках. Таким образом, зерновки твердой пшеницы и зерновки мягкой пшеницы со стекловидным эндоспермом в меньшей степени были подвержены старению по сравнению с зерновками мягкой пшеницы и зерновками с мучнистым эндоспермом соответственно. Импульсное давление повреждало стекловидный эндосперм и ускоряло старение семян. Оно также способствовало длительному хранению зерновок мягкой пшеницы без существенной потери жизнеспособности. Возможно применение обработки зерна мягкой пшеницы для продления срока хранения.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, *Triticum durum*, ближняя инфракрасная спектроскопия, протеин, клейковина, старение семян

Для цитирования: Храмова Я.И., Нефедьева Е.Э., Белопухов С.Л., Дмитриевская И.И., Храмова В.Н. Изменение всхожести, содержания протеина и клейковины в зерновках твердой и мягкой пшеницы после действия импульсного давления и длительного хранения // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 4. С. 602–610. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-602-610. EDN: HLKRDG.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Changes in the germination and content of protein and gluten in the caryopses of hard and soft wheat under pulse pressure and prolonged storage conditions

Yaroslavna I. Khramova*, Elena E. Nefed'eva✉, Sergey L. Belopukhov**,

Inna I. Dmitrevskaya**, Valentina N. Khramova*

*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

**Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

© Храмова Я.И., Нефедьева Е.Э., Белопухов С.Л., Дмитриевская И.И., Храмова В.Н., 2023

Abstract. The study aims to identify the aging characteristics of hard and soft wheat caryopses without treatment and following treatment with pulse pressure created by a shock wave. The grain was treated with pulse pressures of 11 and 29 MPa. After one month and after three years, the caryopses were sorted into vitreous and floury types. The germination of control soft wheat caryopses decreased after storage, while after pulse pressure treatment and storage, it exceeded that of the control. The germination of control hard wheat caryopses with floury endosperm decreased after storage to a greater extent than that of caryopses with vitreous endosperm. Pulse pressure treatment reduced the germination of caryopses with vitreous endosperm. No change was observed in the protein content of control hard wheat caryopses following prolonged storage. In this case, pulse pressure contributed to the reduction in protein content during storage. The protein content of soft wheat caryopses with floury endosperm decreased after storage. In these caryopses, pulse pressure treatment contributed to better protein retention. Thus, the caryopses of hard wheat and soft wheat with vitreous endosperm were less susceptible to aging as compared to the caryopses of soft wheat and caryopses with floury endosperm, respectively. Pulse pressure damaged the vitreous endosperm, accelerating seed aging. It also contributed to the long-term storage of soft wheat caryopses without a significant loss of viability. Thus, it is possible to treat soft wheat grain to extend its shelf life.

Keywords: *Triticum aestivum*, *Triticum durum*, near-infrared spectroscopy, protein, gluten, seed aging

For citation: Khramova Ya.I., Nefed'eva E.E., Belopukhov S.L., Dmitrevskaya I.I., Khramova V.N. Changes in the germination and content of protein and gluten in the caryopses of hard and soft wheat under pulse pressure and prolonged storage conditions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(4):602-610. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-602-610. EDN: HLKRDG.

ВВЕДЕНИЕ

При хранении семена подвергаются процессам старения, что снижает их жизнеспособность и вызывает ухудшение всхожести. Физиологическое ухудшение качества семян во время хранения тесно связано с прорастанием и последующим урожаем зерна [1]. Продолжительность хранения семян зависит от внутренних (наследственных, морфологических, физиологических) и внешних (зараженность патогенами, условия хранения) факторов [2].

Неспособность семян защититься от старения приводит к постепенному разложению хранящегося вещества, нарушению обмена веществ и энергии и в конечном итоге к потере всхожести [1]. Старение семян или их повреждение под действием перечисленных факторов часто объясняют переходом биополимеров из стеклообразного состояния в иные фазово-агрегатные состояния, гидролизом белков и углеводов, а также окислительными реакциями с участием кислорода воздуха и его активных форм [3, 4]. В воздушно-сухих семенах, находящихся в нежизнеспособном состоянии, преобладают неферментативные реакции, не требующие активности ферментов в присутствии большого количества воды [1, 5]. Для старения семян в процессе хранения характерны некоторые физиологические и биохимические изменения, в частности накопление токсичных метаболитов и ингибиторов роста [1].

Понижение жизнеспособности семян в ходе хранения часто связано с разрушением белков и углеводов. При оптимальных условиях хранения содержание этих веществ в семенах изменяется незначительно. При длительном хранении в семенах снижается содержание белка [2]. Денатурация белков семени нарушает обмен веществ при прорастании, в результате уменьшается всхожесть семян [6]. В старение семян вносят вклад гликозилирование белков в результате образования глюкозы – продукта неферментативного гидролиза крахмала [7] – и карбонилирование белков при участии активных форм кислорода [8]. Известно несколько путей карбонилирования белка, например, конъюгация с реак-

ционноспособными карбонильными формами и/или прямое окислительное воздействие, катализируемое металлом, на аминокислотные остатки. Дисфункциональные карбонилированные белки более склонны к деградации или образованию агрегатов, когда протеолитический механизм ингибируется, что наблюдается при старении. В результате искусственного старения в зерновках пшеницы было зафиксировано снижение общего содержания белка, углеводов, активности α -амилазы и высокая электропроводность [9].

Ценность зерна определяется количеством и качеством клейковины [10]. В литературе нет однозначных сведений об изменении количества клейковины и ее свойств в процессе хранения зерна [11].

Импульсное давление (ИД), создаваемое ударной волной, может оказывать конструктивное или разрушительное воздействие в зависимости от типа испытуемого материала, физических и химических характеристик образца, приложенного давления и температуры [12]. Обработка семян растений с применением ударной волны позволяет увеличить всхожесть семян, активировать рост проростков [12] и повысить урожай растений [13, 14], а также продлить срок хранения семян [4, 15].

ИД 11 МПа способствует повышению устойчивости растений и урожая на 15–25% за счет активизации физиологических процессов; динамика роста и других физиологических показателей не изменяется. ИД 29 МПа приводит к состоянию стресса, вызывает изменения в структуре партии семян, изменяет динамику роста, способствует оттоку запасных веществ в семена и плоды, в результате чего урожай возрастает в 2–3 раза [14].

Целью проведенной работы было выявление изменения содержания протеина, клейковины и индекса деформации клейковины (ИДК) зерновок твердой и мягкой пшеницы в процессе хранения без обработки и после обработки ИД, создаваемым ударной волной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования служили два сорта пшеницы. Сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 73 создан в Федеральном аграрном научном центре Юго-Востока.

Разновидность – Graecum. Зерно данного сорта белое, крупное, яйцевидной формы. Бороздка зерна по ширине средняя, неглубокая. Сорт среднепоздний, вегетационный период – 87 дней. Зерновая продуктивность по сравнению со стандартом является высокой, качество зерна высокое. Максимальная урожайность отмечена на уровне 47,4 ц/га.

Сорт яровой твердой пшеницы Саратовская золотистая также создан в Федеральном аграрном научном центре Юго-Востока. Разновидность – Leucurum. Зерно крупное, белое, полуудлиненной формы с довольно глубокой бороздкой, основание зерна голое, окраска его белая с выраженным янтарным оттенком, по консистенции эндосперма зерно стекловидное. Сорт среднеспелый, высокоурожайный. Максимальная урожайность в производственных условиях достигает 35–40 ц/га.

Для обработки семян использовали ударную волну, фронт которой представляет собой область резкого скачка давления, плотности и температуры, распространяющуюся со сверхзвуковой скоростью. ИД возникает при прохождении ударной волны в среде. Оно представляет собой мгновенное сжатие, продолжающееся 14–25 мкс. Семена обрабатывали ИД 11 и 29 МПа, создаваемым ударной волной, распространяющейся в водной среде [13]. ИД на фронте ударной волны рассчитывали по формуле

$$P = 53,3 \times (Q^{1/3}/R)^{1,13},$$

где P – давление, МПа; Q – масса заряда взрывчатого вещества, кг; R – расстояние от центра взрыва до поверхности семян, м. На фронте ударной волны резко возрастают давление и температура среды [13].

Обработку семян проводили в устройстве, схема которого показана на рисунке. На дне стального контейнера (1) размещали кассету из пористого материала с сетчатой крышкой (2), внутри которой находились семена массой до 500 г (3). Контейнер заполняли водой (4) и в толще воды на глубине 7–13 см размещали заряд водостойкого взрывчатого вещества (5) с массой Q на расстоянии R от поверхности семян в соответствии с формулой. Осуществляли детонацию заряда электродетонатором (7). После проведенных операций семена извлекали из кассет. Семена контрольной партии погружали в воду на время, в течение которого проводили обработку экспериментальных партий. Все семена в одинаковых условиях сушили до воздушно-сухого состояния при температуре 20 °С. Семена, прошедшие обработку, хранили в упаковке из бумаги или ткани в сухом темном месте при комнатной температуре.

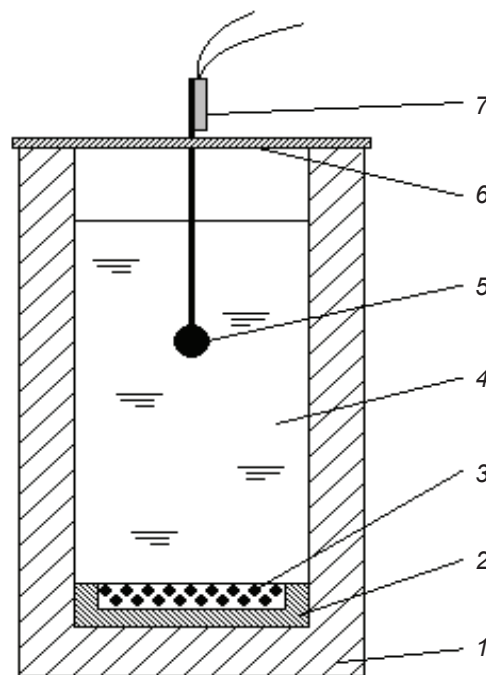


Схема устройства для обработки семян импульсным давлением

Diagram of a device for processing seeds by impulse pressure

Через один месяц (2018 г.) и через три года (2021 г.) после обработки зерновки были отсортированы на диафаноскопе на стекловидные (партия С) и мучнистые (партия М). В каждой партии при помощи анализатора Spectra Star 2600 XT-R, работающего в ближней инфракрасной области спектра, определяли содержание протеина, клейковины, а также ИДК (ГОСТ ISO 12099-2017). Анализы выполняли в учебно-научном центре коллективного пользования «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений» Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К.А. Тимирязева. Эксперименты проводили в трехкратной повторности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были обнаружены изменения всхожести зерновок пшеницы непосредственно после обработки ИД [14], а также после хранения в течение трех лет. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, по исходной всхожести контрольные зерновки яровой мягкой пшеницы соот-

Таблица 1. Влияние обработки импульсным давлением и хранения на всхожесть пшеницы, %

Table 1. Effect of impulse pressure treatment and storage on wheat germination, %

Год	Контроль		Импульсное давление 11 МПа		Импульсное давление 29 МПа	
	Партия М	Партия С	Партия М	Партия С	Партия М	Партия С
Яровая мягкая пшеница Саратовская 73						
2018	95,5±0,5	93,5±0,5	89,0±1,0*	88,5±1,5*	74,5±4,5*	73,0±3,0*
2021	20,0±6,7	26,6±0,5	56,8±3,3*	50,0±10,0	66,7±13,3*	90,0±10,0*
Яровая твердая пшеница Саратовская золотистая						
2018	94,0±1,0	97,5±0,5	96,5±0,5	86,5±2,5*	82,0±3,0*	63±2,0*
2021	53,4±13,3	76,7±10,0	63,3±3,3	70,0±10,0	20,0±12,7	20,0±6,7*

Примечание. $M \pm m$; $n = 4$; * – P_{05} .

ветствовали классу РС-ЭС-ОС (свыше 92%) по ГОСТ 52325-2005. После хранения всхожесть контрольных зерновок упала в 4,8 и 3,5 раза у зерна с мучнистым и стекловидным эндоспермом соответственно. Обработка ИД снизила всхожесть зерновок обоого типа, причем степень влияния ИД зависела от его величины. Через три года после воздействия ИД 11 МПа всхожесть зерновок с мучнистым эндоспермом превышала контрольные значения в 2,8 раза. Под действием ИД 29 МПа всхожесть также значительно превышала контроль, а у стекловидных зерновок возросла даже по сравнению с всхожестью через месяц после обработки. По исходной всхожести контрольные зерновки яровой твердой пшеницы (см. табл. 1) соответствовали классу РС-ЭС-ОС (свыше 90%) по ГОСТ 52325-2002. После трехлетнего хранения всхожесть контрольных зерновок с мучнистым эндоспермом была ниже на 30,4%, чем у зерновок со стекловидным эндоспермом. Обработка ИД 11 МПа не способствовала изменению всхожести зерновок с мучнистым эндоспермом, но привела к небольшому снижению всхожести зерновок со стекловидным эндоспермом. ИД 29 МПа способствовало снижению всхожести, особенно у зерновок со стекловидным эндоспермом (на 35,4%). Через три года после обработки ИД 11 МПа всхожесть зерновок твердой пшеницы с мучнистым и стекловидным эндоспермом существенно не отличалась от контроля. Под действием ИД 29 МПа всхожесть резко упала (в 3,8 раза у зерновок со стекловидным эндоспермом).

Изменения всхожести могут быть связаны с изменением содержания запасных веществ в зерновках пшеницы. Обнаружены различия в содержании протеина в зерновках пшеницы двух сортов (табл. 2). В частности, в зерновках твердой пшеницы изначально (2018 г.) содержание протеина в мучнистых и стекловидных зерновках не отличалось и составляло около 12%. В зерновках мягкой пшеницы изначально содержание протеина в мучнистых и стекловидных зерновках было несколько меньше, чем в зерновках твердой пшеницы. Обработка ИД 11 МПа (2018 г.) не оказала статистически значимого влияния на содержание протеина в зерновках пшеницы обоих сортов. ИД 29 МПа (2018 г.) не повлияло на содержание протеина в зерновках мягкой пшеницы, но способствовало снижению протеина в зерновках твердой пшеницы. Это явление могло быть связано с хрупкостью стекловидного эндосперма и дроблением биополимеров при прохождении ударной волны высокого давления.

Белки подвержены неферментативному гидролизу в процессе хранения семян. При хранении происходят

термодинамически разрешенные реакции, которые протекают с выделением энергии. В частности, в семенах это могут быть реакции распада (гидролиза) запасных веществ. Содержание протеина через три года хранения изменилось (см. табл. 2). Зерновки твердой и мягкой пшеницы реагировали на ИД и последующее хранение по-разному.

В зерновках твердой пшеницы сорта Саратовская золотистая (см. табл. 2) в контроле содержание протеина после трех лет хранения не изменилось как в мучнистых, так и в стекловидных зерновках. Плотная структура эндосперма и преобладание стекловидного состояния биополимеров противодействовало диффузии газов и воды и, как следствие, неферментативному гидролизу. ИД 11 МПа способствовало снижению содержания протеина на 11,5 и 20,0% в мучнистых и стекловидных зерновках пшеницы соответственно за три года хранения. Стекловидное состояние эндосперма характеризуется хрупкостью; рост микротрещин, возникших при обработке зерновок ИД, продолжался в течение срока хранения. Отмечено снижение стекловидности зерна твердой пшеницы после обработки ИД [4]. Эти факторы могли способствовать разрыхлению эндосперма и ускорению реакций неферментативного гидролиза протеина. ИД 29 МПа оказало противоположное действие – непосредственно после обработки в результате мощного сдвигового и компактизирующего воздействия, разрывающего молекулы биополимеров, снизилось содержание протеина, определяемое по количеству пептидных связей. В ходе дальнейшего хранения содержание протеина не изменилось. Ранее было показано, что снижение стекловидности зерна твердой пшеницы после обработки ИД и хранения привело к ухудшению качества зерна и проростков при хранении [4].

У мягкой пшеницы сорта Саратовская 73 (см. табл. 2) содержание протеина в контроле после трех лет хранения снизилось на 24 и 16% в зерновках с мучнистым и стекловидным эндоспермом соответственно. Наши данные соответствуют литературным данным о том, что стекловидное состояние препятствует распаду белка и, следовательно, продляет жизнь семян [3]. Содержание протеина в меньшей степени изменилось у зерновок твердой пшеницы по сравнению с зерновками мягкой пшеницы, у зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с зерновками с мучнистым эндоспермом. Обработка ИД 11 и 29 МПа способствовала лучшему сохранению протеина в зерновках с мучнистым эндоспермом; в зерновках со стекловидным эндоспермом после обработки ИД разрушение протеина было выражено в большей степени по сравнению с контролем. Муч-

Таблица 2. Влияние обработки импульсным давлением и хранения на содержание протеина в зерновках пшеницы, %

Table 2. Effect of impulse pressure treatment and storage on the protein content in wheat grains, %

Год	Контроль		Импульсное давление 11 МПа		Импульсное давление 29 МПа	
	Партия М	Партия С	Партия М	Партия С	Партия М	Партия С
Яровая мягкая пшеница Саратовская 73						
2018	9,17±0,24	11,93±0,31	9,79±0,28*	11,98±0,34	9,50±0,27*	11,90±0,36*
2021	7,01±0,18	10,04±0,25	8,67±0,23*	8,11±0,2*	9,43±0,26*	9,15±0,22*
Яровая твердая пшеница Саратовская золотистая						
2018	12,41±0,33	12,78±0,34	12,20±0,32	13,03±0,35	11,21±0,30	11,06±0,29*
2021	12,65±0,32	12,52±0,3	10,77±0,27*	10,37±0,25*	10,64±0,27*	10,57±0,26*

Примечание. М±m; n = 3; * – P₀₅.

нистая структура компактизировалась под действием ИД, на что указывает линейное увеличение содержания стекловидного вещества в семенах мягкой пшеницы [4].

Обработка зерна мягкой пшеницы ИД увеличила их всхожесть, рост и качество проростков после длительного хранения. ИД увеличивало стекловидность эндосперма семян. Улучшение было обусловлено переходом семян из аномального состояния в нормальное, что было более выражено после действия ИД 11 МПа [4]. В партии семян выделяют фракции, отличающиеся по качеству: фракцию I – сильные семена, фракцию II – ослабленные семена и фракцию III – мертвые семена [7]. Семена этих фракций отличаются по влажности, содержанию растворимых сахаров и другим признакам. Семена фракции I формируют нормальные проростки, имеющие (у пшеницы) не менее двух нормально развитых корешков размером более длины семени и росток размером не менее половины его длины с просматривающимися первичными листочками, занимающими не менее половины длины coleoptilia. Семена фракции II формируют аномальные проростки, имеющие одно из следующих нарушений в развитии: зародышевых корешков нет, их меньше установленной нормы либо они короткие, прекратившие рост, слабые, закрученные, водянистые; coleoptilia пустой, имеет трещину, короче листьев, деформированный, отсутствует; первичные листочки занимают меньше половины coleoptilia или обесцвечены, раздроблены или расщеплены, веретенообразные, водянистые.

В процессе хранения происходит перемещение семян из фракции I во фракцию II. У семян фракции II отмечено увеличение содержания глюкозы по сравнению с семенами фракции I. Уменьшение уровня глюкозы за счет аминокарбонильной реакции, сопровождающей естественное старение при хранении, в семенах фракции II переводит их в категорию «улучшенных» семян с более высокой всхожестью. Это явление способствует временному увеличению всхожести семян в ходе старения [7].

Обработка зерна мягкой пшеницы ИД увеличила их всхожесть, рост и качество проростков после длительного хранения. ИД увеличивало стекловидность

эндосперма семян. Вероятно, это было обусловлено переходом семян из фракции I во фракцию II, что было более выражено после действия ИД 11 МПа [4].

Клейковина представляет собой комплекс белков, содержащий также углеводы, липиды и минеральные вещества. Клейковинные белки формируются путем агрегации отдельных молекул белка с помощью водородных, дисульфидных, ионных (электростатических) связей [10]. В процессе созревания в зерне и муке изменяются количество и качество клейковины, благодаря этому процессу она приобретает высокие качественные показатели¹. Показано, что массовая доля клейковины в течение хранения до одного года имела тенденцию к увеличению [12], а через два года наблюдалось снижение количества и качества клейковины¹.

Из данных табл. 3 видно, что содержание клейковины и динамика его изменения в зерновках твердой и мягкой пшеницы отличаются.

Исходное содержание клейковины (см. табл. 3, 2018 г.) в контрольных зерновках твердой пшеницы сорта Саратовская золотистая с мучнистым эндоспермом и в зерновках со стекловидным эндоспермом не различалось. Обработка ИД 11 МПа способствовала увеличению содержания клейковины в зерновках с мучнистым эндоспермом на 8% и снижению содержания клейковины в зерновках со стекловидным эндоспермом на 10%. Данное явление можно объяснить компактизацией мучнистого вещества и разломом биополимеров в стекловидном состоянии. Обработка ИД 29 МПа не способствовала существенному увеличению содержания клейковины в зерновках с мучнистым эндоспермом (8%), но привела к увеличению содержания клейковины в зерновках со стекловидным эндоспермом на 15%. Поскольку клейковина представляет собой комплекс веществ, а при интенсивной механической обработке зерна для получения пшеничной муки клейковина укрепляется¹, такое явление может быть связано с происходящими процессами сжатия под действием ИД.

В процессе хранения содержание клейковины (см. табл. 3, 2021 г.) в контрольных зерновках твердой пшеницы с мучнистым эндоспермом снизилось на 7%,

Таблица 3. Влияние обработки импульсным давлением и хранения на содержание клейковины, %, а также индекс деформации клейковины в зерновках пшеницы

Table 3. Effect of impulse pressure treatment and storage on gluten content, %, and gluten deformation index in wheat grains

Год	Контроль		Импульсное давление 11 МПа		Импульсное давление 29 МПа	
	Партия М	Партия С	Партия М	Партия С	Партия М	Партия С
Яровая мягкая пшеница Саратовская 73						
2018	13,90±0,34	18,58±0,48	13,16±0,33	15,94±0,40*	14,35±0,35	19,59±0,49
2021	10,76±0,27	13,72±0,35	15,58±0,41*	13,49±0,34	14,53±0,37*	15,35±0,39*
Индекс деформации клейковины						
2021	78,83±2,10	79,01±2,09	82,5±2,20	81,92±2,18	67,59±1,96*	78,83±2,11
Яровая твердая пшеница Саратовская золотистая						
2018	19,20±0,48	19,78±0,50	20,76±0,53	17,88±0,46*	19,79±0,49	22,77±0,58*
2021	17,81±0,43	13,80±0,33	15,26±0,38*	14,08±0,36	15,48±0,38*	13,96±0,36
Индекс деформации клейковины						
2021	79,08±2,11	81,94±2,18	81,1±2,15	81,76±2,18	79,34±2,13	80,65±2,18

Примечание. М±m; n = 3; * – P₀₅.

¹Кошаев А.Г., Дмитренко С.Н., Жолобова И.С. Биохимия сельскохозяйственной продукции: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2018. 388 с.

в зерновках со стекловидным эндоспермом – на 30%. После обработки ИД и хранения содержание клейковины в зерновках с мучнистым эндоспермом было ниже, чем в соответствующих зерновках в контроле, а в зерновках со стекловидным эндоспермом соответствовало контролю. Отсутствовала корреляция между динамикой изменения содержания белка и клейковины в зерновках твердой пшеницы рассматриваемого сорта.

Исходное содержание клейковины (см. табл. 3, 2018 г.) в контрольных зерновках мягкой пшеницы сорта Саратовская 73 с мучнистым эндоспермом было на 25% ниже, чем в зерновках со стекловидным эндоспермом. После обработки ИД 11 МПа содержание клейковины в зерновках с мучнистым эндоспермом не изменилось, а в зерновках со стекловидным эндоспермом оно снизилось на 14,2%. Указанное явление может быть обусловлено расколами биополимеров, находящихся в стекловидном состоянии. После обработки ИД 29 МПа содержание клейковины в зерновках с мучнистым и стекловидным эндоспермом существенно не изменилось.

Известно, что растворимые сахара оказывают влияние на свойства клейковины. Экстрагируемый водой арабиноксилан может улучшить характеристики клейковины, в частности вязкоупругость клейковины при нагревании [16]. Накопление растворимых продуктов неферментативного гидролиза полисахаридов в процессе старения [7] может оказать влияние на свойства клейковины зерна. Свойства клейковины зависят от особенностей ее состава, структуры, способа обработки, pH, температуры, присутствия углеводов, липидов и т. д. [17].

ИДК зерновок пшеницы обоих сортов после трехлетнего хранения (см. табл. 3) существенно не изменялся. Единственным исключением являлось снижение ИДК у зерновок мягкой пшеницы с мучнистым эндоспермом, обработанных ИД 29 МПа.

Причины изменений свойств биополимеров зерновок связаны как со старением, так и с эффектами, возникающими после прохождения ударной волны в твердом веществе семени. Последствия прохождения ударной волны через вещество могут быть следующими: раздробление материала, разрушение кристаллической решетки, распад сложных веществ на более простые, полимеризация мономеров. Известно, что после прохождения ударных волн аминокислоты превращаются в полипептиды. Полимеры, в свою очередь, могут частично распадаться до олигомеров и мономеров, вулканизироваться (некоторые каучуки), претерпевать структурные изменения, уменьшение растворимости и изменение цвета². Давление ускоряет реакции, идущие с уменьшением объема. При прохождении ударной волны в твердом теле возникают напряжения и сдвиговые деформации, время развития которых составляет 0,1 мкс, что меньше времени прохождения ударной волны (14–25 мкс). Вещества претерпевают физико-химические превращения, вследствие которых их свойства после прохождения ударной волны значительно отличаются от изначальных свойств при нормальных условиях [18].

Семена в воздушно-сухом состоянии не осуществляют ферментативные и репарационные превращения, так как находятся в состоянии гипо- и криптобиоза (вынужденного или физиологического покоя). Физические воздействия не могут непосредственно повлиять на их жизнедеятельность, но оставляют скрытые повреждения, которые реализуются при жизнедеятельном состоянии семян [14]. При обработке ИД в семени образуются повреждения, которые продолжают развиваться в дальнейшем при хранении. Эти эффекты могут быть связаны с дроблением, появлением трещин, которые будут продолжать увеличиваться в процессе хранения, или фазовыми переходами полимеров [19]. Возможно также смещение химического равновесия неферментативных превращений, идущих с уменьшением влажности.

Ударные волны, возникающие при обмолоте зерна, проходят последовательно через каждый слой клеток оболочки и уходят через ткани эндосперма к геометрическому центру зерна. Также последовательно происходит релаксация упругих тканей оболочки. При этом пластичные ткани остаются деформированными, а упругие возвращаются в первоначальное положение. В пределах одного слоя клеток релаксация упругих тканей в различных точках поверхности контакта по-разному растянута во времени, что связано с разной степенью приближения к границе упругости [20].

Биополимеры в семенах присутствуют в кристаллическом и аморфном фазово-агрегатных состояниях³. Формами аморфного состояния являются вязкотекучее, эластичное и стеклообразное состояния. Соотношение веществ в стеклообразном и прочих состояниях определяет стекловидность эндосперма, которая, в свою очередь, характеризуется прочностью связи крахмала и белка. Стекловидное зерно более устойчиво к механическим воздействиям, но характеризуется хрупкостью. Релаксационные переходы из одного аморфного состояния в другое зависят от температуры и давления³. В частности, испытывая объемное сжатие с давлением стеклования, полимер переходит в стеклообразное состояние. Величина давления стеклования зависит от скорости воздействия и температуры³. Минимальное время релаксации составляет $10^{-2} \dots 10^{-3}$ мкс, что существенно меньше времени прохождения ударной волны. Стеклообразные полимеры имеют бесконечно большие времена релаксации, что затрудняет их переход в другие состояния в ударной волне, но не препятствует формированию трещин. Известно, что переход биополимеров в стеклообразное состояние продляет время хранения семян без потери жизнеспособности [3], поскольку при нормальных условиях переход из стеклообразного состояния в другие фазово-агрегатные состояния происходит крайне медленно. Следовательно, оказывая влияние на параметры стеклообразного состояния биополимеров семян путем обработки ИД, мы способствуем изменениям биополимеров и параметров выхода из состояния покоя. В результате развивается последствие ИД у зерновок.

²Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия: учебник для вузов. СПб.: Лань, 2014. 744 с.

³Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров: учебник для вузов. СПб.: Лань, 2022. 368 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зерновки сортов твердой и мягкой пшеницы реагировали на ИД и длительное хранение по-разному. Зерновки твердой пшеницы и зерновки твердой и мягкой пшеницы со стекловидным эндоспермом были подвержены старению в меньшей степени, чем зерновки мягкой пшеницы и зерновки с мучнистым эндоспермом соответственно, что выражалось в лучшем сохранении всхожести и более высоком содержании протеина после хранения. Вероятно, компактирование биополимеров зерна в ударной волне способствовало замедлению реакций старения, связанных с диффузией паров воды

и кислорода и разрушением протеина, и продлеvalo жизнеспособность зерновок. С другой стороны, возможно, ИД способствовало образованию микроповреждений и ускоряло старение и распад протеина в хрупком стекловидном эндосперме. В то же время ИД способствовало сохранению всхожести и содержания протеина в зерновках мягкой пшеницы, особенно с мучнистым эндоспермом. Можно рекомендовать применение обработки зерновок мягкой пшеницы для продления срока хранения, в том числе для хранения ценного и коллекционного зерна.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lv Y., Zhang S., Wang J., Hu Y. Quantitative proteomic analysis of wheat seeds during artificial ageing and priming using the isobaric tandem mass tag labeling // PLoS ONE. 2016. Vol. 11, no. 9. P. e0162851. DOI: 10.1371/journal.pone.0162851.
2. Мамедова С.А., Бабаева М.А. Оценка стрессоустойчивости генотипов синтетической пшеницы японского происхождения // Успехи современного естествознания. 2022. N 2. С. 14–19. DOI: 10.17513/use.37772. EDN: GWKLM1.
3. Bernal-Lugo I., Leopold A.C. Changes in soluble carbohydrates during seed storage // Plant Physiology. 1992. Vol. 98, no. 3. P. 1207–1210. DOI: 10.1104/pp.98.3.1207.
4. Nefedieva E.E., Khranova Ya.I., Khranova V.N., Gorlov I.F., Lysak V.I., Slozhenkina M.I. Dependence of germination of wheat grains after the treatment by impulse pressure and long-term storage on the vitreousness of endosperm // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 677. P. 032078. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032078.
5. Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Molecular genetic bases of seed resistance to oxidative stress during storage // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Т. 24. N 5. С. 451–458. DOI: 10.18699/VJ20.47-о. EDN: FRHCMO.
6. Митрофанова О.П., Хакимова А.Г. Новые генетические ресурсы в селекции пшеницы на увеличение содержания белка в зерне // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016. Т. 20. N 4. С. 545–554. DOI: 10.18699/VJ16.177. EDN: WMUFYV.
7. Veselovsky V.A., Veselova T.V. Lipid peroxidation, carbohydrate hydrolysis, and Amadori-Maillard reaction at early stages of dry seed aging // Russian Journal of Plant Physiology. 2012. Vol. 59, no. 6. P. 811–817. DOI: 10.1134/S1021443712030181.
8. Ciacka K., Tymiński M., Gniazdowska A., Krasuska U. Carbonylation of proteins – an element of plant ageing // Planta. 2020. Vol. 252. P. 12. DOI: 10.1007/s00425-020-03414-1.
9. Patil K.G., Karjule A., Patel D.A., Sasidharan N. Effect of accelerated ageing on viability and longevity of wheat (*Triticum aestivum*) seed // Indian Journal of Agricultural Sciences. 2019. Vol. 89, no. 6. P. 920–928. DOI: 10.56093/ijas.v89i6.90760.
10. Нецветаев В.П., Бондаренко Л.С., Рыжкова Т.А. Новый подход к оценке пшеницы качества зерна мягкой // Достижения науки и техники АПК. 2012. N 9. С. 24–27. EDN: PCYGOX.
11. Гурьева К.Б., Хаба Н.А., Корнева О.С., Тарасова Е.А., Белецкий С.А. Мониторинг белкового комплекса пшеницы и кислорода и разрушением протеина, и продлеvalo жизнеспособность зерновок. С другой стороны, возможно, ИД способствовало образованию микроповреждений и ускоряло старение и распад протеина в хрупком стекловидном эндосперме. В то же время ИД способствовало сохранению всхожести и содержания протеина в зерновках мягкой пшеницы, особенно с мучнистым эндоспермом. Можно рекомендовать применение обработки зерновок мягкой пшеницы для продления срока хранения, в том числе для хранения ценного и коллекционного зерна.
- при долгосрочном хранении // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд: международный научный сборник: открытое приложение к информационному сборнику «Теория и практика длительного хранения». М., 2020. Вып. 14. С. 91–104. EDN: ZRBRWI.
12. Ramesh R., Vidhya V., Khan F.L.A., Alnasrawi A.M., Alkahtani J., Elshikh M.S., et al. Shockwave treated seed germination and physiological growth of *Vigna mungo* (L) in red soil environment // Physiological and Molecular Plant Pathology. 2022. Vol. 117. P. 101747. DOI: 10.1016/j.pmp.2021.101747.
13. Павлова В.А., Лысак В.И., Нефедьева Е.Э., Булакова Е.В., Шайхiev И.Г. Влияние параметров ударно-волнового нагружения на состояние биополимеров и поглощение воды семенами гречихи // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. N 10. С. 79–84. EDN: UCBPBP.
14. Нефедьева Е.Э., Лысак В.И. Импульсное давление как фактор регуляции роста, развития и продуктивности растений // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Обнинск, 26–28 сентября 2018 г.). Обнинск: Изд-во ВНИИРАЭ, 2018. С. 296–298. EDN: YXVFYT.
15. Пат. № 175463, Российская Федерация, МПК А01 С1/06. Устройство для обработки семян, подлежащих хранению / Е.Э. Нефедьева, А.Б. Голованчиков, В.А. Павлова, В.И. Лысак, С.В. Кузьмин, В.А. Балашов. Заявл. 06.06.2017; опубл. 06.1.2017. Бюл. № 34.
16. Zhao X., Hou C., Tian M., Zhou Yu., Yang R., Wang X., et al. Effect of water-extractable arabinoxylan with different molecular weight on the heat-induced aggregation behavior of gluten // Food Hydrocolloids. 2020. Vol. 99. P. 105318. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105318.
17. Колпакова В.В., Студенникова О.Ю. Гидратационная способность и физико-химические свойства белков пшеничной клейковины // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. N 2-3. С. 5–8. EDN: KXBPOV.
18. Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Расчет ударных адиабат смесей при высоких давлениях // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛАПЛАЗ-2021: сб. науч. тр. VII Междунар. конф. (г. Москва, 23–26 марта 2021 г.). М.: Изд-во МИФИ, 2021. С. 454–455. EDN: YSTIQP.
19. Храмова Я.И., Дмитриевская И.И., Белопухов С.Л., Нефедьева Е.Э., Храмова В.Н. Влияние импульсного давления на стекловидность, влажность и всхожесть зер-

новок пшеницы при хранении // *Агрофизика*. 2023. N 1. С. 15–23. DOI: 10.25695/AGRPH.2023.01.03. EDN: XZTEEL.

20. Бахареv Д.Н. Прикладные аспекты волновой

теории удара в теоретических исследованиях обмолота початков кукурузы // *Иновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2020. N 2. С. 9–16. EDN: KYPPZF.

REFERENCES

1. Lv Y., Zhang S., Wang J., Hu Y. Quantitative proteomic analysis of wheat seeds during artificial ageing and priming using the isobaric tandem mass tag labeling. *PLoS ONE*. 2016;11(9):e0162851. DOI: 10.1371/journal.pone.0162851.

2. Mamedova S.A., Babayeva M.A. Assessment of stress resistance of Japanese origin genotypes of synthetic wheat. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2022;2:14–19. (In Russian). DOI: 10.17513/use.37772. EDN: GWKLMI.

3. Bernal-Lugo I., Leopold A.C. Changes in soluble carbohydrates during seed storage. *Plant Physiology*. 1992;98(3):1207–1210. DOI: 10.1104/pp.98.3.1207.

4. Nefedieva E.E., Khramova Ya.I., Khramova V.N., Gorlov I.F., Lysak V.I., Slozhenkina M.I. Dependence of germination of wheat grains after the treatment by impulse pressure and long-term storage on the vitreousness of endosperm. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;677:032078. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032078.

5. Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Molecular genetic bases of seed resistance to oxidative stress during storage. *Vavilovskii zhurnal genetiki i seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(5):451–458. DOI: 10.18699/VJ20.47-o. EDN: FRHCOMO.

6. Mitrofanov O.P., Khakimova A.G. New genetic resources in wheat breeding for an increased grain protein content. *Vavilovskii zhurnal genetiki i seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):545–554. (In Russian). DOI: 10.18699/VJ16.177. EDN: WMUFYV.

7. Veselovsky V.A., Veselova T.V. Lipid peroxidation, carbohydrate hydrolysis, and Amadori-Maillard reaction at early stages of dry seed aging. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2012;59(6):811–817. DOI: 10.1134/S1021443712030181.

8. Ciacka K., Tymiński M., Gniazdowska A., Krasuska U. Carbonylation of proteins – an element of plant ageing. *Planta*. 2020;252:12. DOI: 10.1007/s00425-020-03414-1.

9. Patil K.G., Karjule A., Patel D.A., Sasidharan N. Effect of accelerated ageing on viability and longevity of wheat (*Triticum aestivum*) seed. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2019;89(6):920–928. DOI: 10.56093/ijas.v89i6.90760.

10. Netsvetaev V.P., Bondarenko L.S., Akinshina O.V. Innovative approach to the assessment of wheat grain quality. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012;9:24–27. (In Russian). EDN: PCYGXO.

11. Guryeva K.B., Khaba N.A., Korneva O.S., Tarasova E.A., Beletskiy S.L. Heat protein complex monitoring for long-term storage. In: *Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva i khraneniya material'nykh tsennostei dlya gosudarstvennykh nuzhd: mezhdunarodnyi nauchnyi sbornik: otkrytoe prilozhenie k informatsionnomu sborniku «Teoriya i praktika dlitel'nogo khraneniya» = Innovative technologies for possessing and storage of material values for state needs: International scientific collection: open appendix to the information collection “Theory and practice*

of long-term storage”. Moscow; 2020, vol. 14, p. 91–104. (In Russian). EDN: ZRBRWI.

12. Ramesh R., Vidhya V., Khan F.L.A., Alnasrawi A.M., Alkahtani J., Elshikh M.S., et al. Shockwave treated seed germination and physiological growth of *Vigna mungo* (L) in red soil environment. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2022;117:101747. DOI: 10.1016/j.pmp.2021.101747.

13. Pavlova V.A., Lysak V.I., Nefed'eva E.E., Bulgakova E.V., Shaikhiev I.G. Influence of shock-wave loading parameters on the state of biopolymers and water absorption by buckwheat seeds. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*. 2015;18(10):79–84. (In Russian). EDN: UCBBP.

14. Nefed'eva E.E., Lysak V.I. Impulse pressure as a factor of regulation of growth, development and productivity of plants. In: *Radiatsionnye tekhnologii v sel'skom khoziaistve i pishchevoi promyshlennosti: sostoyaniye i perspektivy: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Radiation technologies in agriculture and food industry: current state and prospects: proceedings of the International research and practice conference*. 26–28 September 2018, Obninsk. Obninsk: Russian Institute of Radiology and Agroecology; 2018, p. 296–298. (In Russian). EDN: YXVFYT.

15. Nefed'eva E.E., Golovanchikov A.B., Pavlova V.A., Lysak V.I., Kuz'min S.V., Balashov V.A. *Device for seeds processing to be stored*. Patent RF, no. 175463; 2017. (In Russian).

16. Zhao X., Hou C., Tian M., Zhou Yu., Yang R., Wang X., et al. Effect of water-extractable arabinoxylan with different molecular weight on the heat-induced aggregation behavior of gluten. *Food Hydrocolloids*. 2020;99:105318. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105318.

17. Kolpakova V.V., Studennikova O.Yu. Hydration capacity and physico-chemical properties of wheat gluten proteins. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya = Izvestiya vuzov. Food technology*. 2009;2-3:5–8. (In Russian). EDN: KXBPOV.

18. Seredkin N.N., Khishchenko K.V. Calculation of shock adiabats of mixtures at high pressures. In: *Lazernye, plazmennye issledovaniya i tekhnologii – LAPLAZ-2021: sb. nauch. tr. VII Mezhdunar. konf. = Laser, plasma research and technology LAPLAZ-2021: Proceedings of the 7th International symposium*. 23–26 March 2021, Moscow. Moscow: Moscow Engineering Physics Institute; 2021, p. 454–455. (In Russian). EDN: YSTIQP.

19. Khramova Ya.I., Dmitrevskaya I.I., Belopukhov S.L., Nefed'eva E.E., Khramova V.N. Influence of impulse pressure on vitreousness, moisture content and germination of wheat grains during storage. *Agrofizika = Agro-physica*. 2023;1:15–23. (In Russian). DOI: 10.25695/AGRPH.2023.01.03. EDN: XZTEEL.

20. Baharev D.N. Applied aspects of the impact wave theory in theoretical studies of corn cobs threshing. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives*. 2020;2:9–16. (In Russian). EDN: KYPPZF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Храмова Ярославна Игоревна,
аспирант,
Волгоградский государственный
технический университет,
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,
Российская Федерация,
yaroslavnacosmos@icloud.com
<https://orcid.org/0000-0003-2194-461X>

Нефедьева Елена Эдуардовна,
д.б.н., доцент, профессор,
Волгоградский государственный
технический университет,
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,
Российская Федерация,
✉ nefedieva@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4782-3835>

Белопухов Сергей Леонидович,
д.с.-х.н., профессор, профессор,
Российский государственный аграрный
университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
Российская Федерация,
sbelopuhov@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4473-4466>

Дмитревская Инна Ивановна,
д.с.-х.н., доцент, заведующий кафедрой,
Российский государственный аграрный
университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
Российская Федерация,
i.dmitrevskaya@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7497-2393>

Храмова Валентина Николаевна,
д.б.н., профессор,
профессор, декан,
Волгоградский государственный
технический университет,
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,
Российская Федерация,
hramova_vn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7630-7672>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.01.2023.
Одобрена после рецензирования 17.10.2023.
Принята к публикации 31.10.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yaroslavna I. Khranova,
Postgraduate Student,
Volgograd State Technical University,
28, Lenin Ave., Volgograd, 400005,
Russian Federation,
yaroslavnacosmos@icloud.com
<https://orcid.org/0000-0003-2194-461X>

Elena E. Nefed'eva,
Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Professor,
Volgograd State Technical University,
28, Lenin Ave., Volgograd, 400005,
Russian Federation,
✉ nefedieva@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4782-3835>

Sergey L. Belopukhov,
Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Professor,
Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazev St., Moscow, 127550,
Russian Federation,
sbelopuhov@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4473-4466>

Inna I. Dmitrevskaya,
Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor,
Head of the Department,
Russian State Agrarian University –
Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazev St., Moscow, 127550,
Russian Federation,
i.dmitrevskaya@rgau-msha.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7497-2393>

Valentina N. Khranova,
Dr. Sci. (Biology), Professor,
Professor, Dean,
Volgograd State Technical University
28, Lenin Ave., Volgograd, 400005,
Russian Federation,
hramova_vn@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7630-7672>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 19.01.2023.
Approved after reviewing 17.10.2023.
Accepted for publication 31.10.2023.