

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-11-16

**Технологический процесс производства зерновой патоки: пути оптимизации***Нечаев Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент*nechaev-v@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Российская Федерация, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22

Аннотация. Добавление в рацион коров зерновой патоки позволяет повысить энергетическую питательность корма. Недостаток данных о силе смятия зерновки в процессе приготовления корма, вязкости и текучести зерновой патоки в зависимости от вида злаковой культуры сужает представление о возможных способах совершенствования процесса производства зерновой патоки. С этой целью проведено сравнение физико-механических характеристик зерна ярового ячменя (сорт Раушан), озимой ржи (сорт Графиня), яровой пшеницы (сорт Московская 35) по силе смятия. Доказано, что максимальной силой смятия зерна (10 Н) характеризуется ячмень (в 1,06 раза больше, чем озимая рожь, и в 2,00 раза больше, чем яровая пшеница). Доказано, что применение решётки пассивного измельчителя позволяет ускорить процесс разрушения зерна в среднем на 15,0%. Выявлена зависимость между силой смятия зерна, временем циркуляции водно-зерновой смеси в водяном контуре установки, температурой, кинематической вязкостью водно-зерновой смеси и текучестью зерновой патоки. Максимальный потенциал вязкости водно-зерновой смеси наблюдался в диапазоне температур 34...56°C. При этом вязкость водно-ржаной смеси выше, чем водно-пшеничной и водно-ячменной смесей. Установлено, что использование измельчённого зерна повышает стартовое значение вязкости смеси в 10 раз по сравнению с целым зерном, но при 60°C эта разница не превышает 4% (на примере ярового ячменя). Кинематическая вязкость готового продукта в период постферментации для пшеничной и ячменной патоки возрастает соответственно в 2,7 и 1,6 раза, для ржаной патоки снижается в 1,2 раза. При этом текучесть пшеничной патоки составляет $0,129 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹, ржаной – $0,53 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹, ячменной – $0,3 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹. В целях оптимизации процесса производства зерновой патоки необходимо ячмень загружать в технологическую ёмкость измельчённым либо целым при температуре воды менее 30°C; уменьшать процентное соотношение зерна пшеницы к воде при загрузке или добавлять воду в конце рабочего процесса.

Ключевые слова: зерно, процесс производства зерновой патоки, водно-зерновая смесь, зерновая патока, сила смятия зерна, вязкость водно-зерновой смеси, текучесть зерновой патоки, пассивный измельчитель

Формат цитирования: Нечаев В.Н. Технологический процесс производства зерновой патоки: пути оптимизации // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 5. С. 11-16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-11-16>.

© Нечаев В.Н., 2023

ORIGINAL ARTICLE

Technological process of grain molasses production: ways to optimize*Vladimir N. Nechaev, CSc (Eng), Associate Professor*nechaev-v@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7566-6013>

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics; 22, Oktyabrskaya Str., Knyaginino, 606340, Russian Federation

Abstract. Enriching the diet of cows with grain molasses increases the energy value of forage. Lack of data on the grain crumbling force acting in the process of fodder preparation; viscosity and fluidity of grain molasses depending on the type of cereal crop prevents finding possible ways to improve grain molasses production. To solve this problem, the author compared physical and mechanical characteristics of the grain of spring barley (the Raushan variety), winter rye (the Grafinya variety), and spring wheat (the Moskovskaya 35 variety) on the force of crumbling. The study proved that the maximum force of grain crumbling (10 N) is characteristic of barley (1.06 times more than winter rye and 2.00 times more than spring wheat). It was also found that the use of a passive grain crusher with a grating accelerates grain crushing by 15.0% on average. The study revealed the relationship between the force of grain crumbling, circulation time of water-grain mixture in the water circuit of the plant, temperature, kinematic viscosity of water-grain mixture, and the fluidity of grain molasses. The maximum viscosity potential of the water-grain mixture was observed

in the temperature range of 34 to 56°C, and the viscosity of water-rye mixture was higher than that of water-wheat and water-barley mixtures. It was found that the use of crushed grain increases the starting value of the mixture viscosity by 10 times as compared to the whole grain. However, at 60°C this difference does not exceed 4% (as exemplified by spring barley). The kinematic viscosity of the finished product during post-fermentation for wheat and barley molasses increases in 2.7 and 1.6 times, respectively, while for rye molasses it decreases in 1.2 times. The fluidity of wheat molasses is $0.129 \cdot 10^{-3} \text{ cP}^{-1}$, rye – $0.53 \cdot 10^{-3} \text{ cP}^{-1}$, barley – $0.3 \cdot 10^{-3} \text{ cP}^{-1}$. To optimize grain molasses production, it is necessary to feed crushed barley into the technological container, or feed whole barley at water temperature less than 30°C; reduce the percentage ratio of wheat grain to water during feeding or add water at the end of the working process.

Keywords: grain, grain molasses production, water-grain mixture, grain molasses, grain crumbling force, viscosity of water-grain mixture, fluidity of grain molasses, passive grain crusher

For citation: Nechaev V.N. Technological process of grain molasses production: ways to optimize. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(5):11-16. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-11-16>.

Введение. Производство концентрированных легкопереваримых и сбалансированных по всем питательным веществам кормов для высокоудойных коров является актуальной проблемой. Обострение проблемы вызвано в первую очередь дефицитом сахаров, сырого и переваримого протеина в рационе животных, приводящим к нарушению обмена веществ и развитию вторичных иммунодефицитов¹ [1]. Добавление в рацион зерновой патоки позволяет восполнить дефицит кормового сахара, протеина и в целом повысить энергетическую питательность корма [2]. Знание реологических свойств зерновой патоки, например, её вязкости, является важным как при конструировании и оценке эффективности работы соответствующего технологического оборудования для её приготовления, транспортировки, раздачи, так и для прогнозирования стабильности корма при хранении [3, 4]. Учёт таких свойств при численном моделировании процессов, происходящих в установках, позволит создавать новые продукты желаемого вкуса, текстуры и определённой текучести.

В научно-технической литературе, изучающей процесс производства зерновой патоки, отсутствуют сведения о характере изменения твердости или силы смятия зерновки за время приготовления корма, о том, каким образом меняются вязкость и текучесть зерновой патоки в зависимости от вида злаковой культуры и как меняется вязкость за время ферментации. Недостаток этих данных сужает представление о возможных способах совершенствования технологии приготовления и раздачи кормосмесей с включением в их состав зерновой патоки.

Цель исследований: определить прочностные свойства зерна в процессе приготовления зерновой патоки, а также вязкость водно-зерновой смеси на определённых температурных режимах и в конце ферментации.

¹ Мотовилов К.Я., Мотовилов О.К., Аксенов В.В. Нанобиотехнологии в производстве зерновых патонок для животноводства: Монография. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2015. 134 с.

Материалы и методы. Процесс производства зерновой патоки обеспечивался с помощью установки, разработанной сотрудниками Княгининского университета (рис. 1). Установка предусматривает замкнутый водяной контур, состоящий из системы трубопроводов с запорными кранами, центробежного насоса и технологической ёмкости с пассивным измельчителем.

Технология предусматривает следующие этапы: нагрев воды, загрузку зерна и фермента, получение водно-зерновой смеси, выдержку смеси и получение зерновой патоки.

После предварительного заполнения технологической ёмкости необходимым объёмом воды и включения центробежного насоса происходит нагрев воды до 30°C за счёт постоянной циркуляции в замкнутом водяном контуре. Далее, при достижении заданной температуры, зерно и фермент равномерно засыпаются в технологическую ёмкость установки. После этого в водяном контуре начинают циркулировать вода, зерно и фермент до образования однородной суспензии и достижения ею температуры 58...60°C. Далее центробежный насос отключается, и запускается процесс ферментации продолжительностью 1,0-1,5 ч.

Пассивный измельчитель с рациональным углом наклона и диаметром отверстий решётки под определённую злаковую культуру способствует сокращению



Рис. 1. Общий вид установки
Fig. 1. General view of the installation

процесса приготовления зерновой патоки [5, 6], повышает ресурс рабочего колеса центробежного насоса и даёт возможность использовать не только измельченное (плющенное), но и цельное зерно. Центробежный насос, являясь генератором тепла, обеспечивает массоперенос, перемешивание и образование новых поверхностей путём взаимодействия с частицами смеси, направляет их к решётке пассивного измельчителя, где происходит дополнительное их измельчение.

Для реализации серии опытов и приготовления зерновой патоки выбраны яровая ячмень (сорт Раушан), озимая рожь (сорт Графиня), яровая пшеница (сорт Московская 35) как наиболее распространённые виды зерна в хозяйствах, используемые при производстве кормов, выработке комбикормов и переработке их в жидкие сахаристые кормосмеси¹ [3, 6].

На первом этапе определены физико-механические параметры зерна: влажность, натура и эквивалентный диаметр зерна, определяемый как диаметр шара объёмом, равным объёму одной зерновки (табл. 1). Для определения влажности зерна использован влагомер Фауна-М.

При определении значения силы смятия использовалась малая выборка из 15 шт. зёрен каждого вида, взятых из тех же партий зерна, из которых приготавливалась патока. При измерении зерновка располагалась горизонтально на неподвижной плоской опорной поверхности бороздкой вверх, а сверху прижималась плоской насадкой подвижного штока динамометра до характерного разрушения тела зерновки. При таком расположении площадь поперечного сечения зерновки является максимальной, что позволяет в большей степени раскрыть эндосперм при смятии [7]. На цифровом мониторе динамометра Мегеон фиксировалось максимальное значение силы смятия $F_{см}$ в кН.

Вязкость водно-зерновой смеси определялась вискозиметром Viscolead Advance со сменными адаптерами с разными пределами допустимой максимальной вязкости. В контейнер помещалась исследуемая смесь объёмом порядка 0,7 л. В меню Measurement Configuration задавались параметры измерения вязкости жидкой среды: тип шпинделя серии R (ротационный), скорость вращения шпинделя, об/мин, плотность жидкого

образца, г/см³. Автоматически сообщалось максимальное значение вязкости, определяемой при выбранных параметрах шпинделя и скорости. Далее в контейнер со смесью погружались шпиндель до середины метки на его оси и температурный зонд вискозиметра. После нажатия кнопки ON в меню Measuring отслеживалась процентная величина закручивания пружины. Результат считался значимым, если момент закручивания находился в пределах 50...95%. Это достигалось регулировкой скорости вращения и (или) сменой шпинделя.

Результаты и их обсуждение. Значения силы смятия по видам культур представлены в форме сравнительной диаграммы размаха (рис. 2). Максимальное значение определяемого показателя присуще ржи, но в среднем сила смятия зерновки ячменя больше, чем зерновки ржи, на 6,3%, а для зерновки пшеницы значение меньше в 2 раза. Равномерное распределение значений и небольшая дисперсия характерны для ячменя. Найденные значения являлись начальным условием при определении зависимости изменения силы смятия от времени циркуляции водно-зерновой смеси в водяном контуре установки.

Для каждой культуры проведена отдельная серия опытов. Решётка пассивного измельчителя устанавливалась с оптимальными значениями угла наклона и диаметром отверстий, при которых зафиксированы наименьшие удельные энергозатраты: например, для ржи угол настраивался на 60°, диаметр отверстий решётки – 6 мм. Согласно технологии, исходя из 50 кг готовой зерновой патоки, отмеряли 1/3 часть зерна + фермент и 2/3 воды. В процессе приготовления зерновой патоки с периодичностью в 7,5 мин отбирались пробы мерным ведёрком из-под сливного отверстия нагнетательного трубопровода. После этого из пробы выделялась одна часть навеской 100 г и равномерно распределялась по плоской чаше. Отбирались менее разрушенные зерновки, и в трёхкратной повторности определялась сила смятия на динамометре. Полученные результаты сведены в таблицу 2. Наименьшее время достижения рабочей смесью температуры 60°C, равное 30 мин, отмечено у пшеницы; немного больше – для водно-ржаной смеси, и самый длительный процесс (40,48 мин) зафиксирован для водно-ячменной смеси.

Основные физико-механические параметры зерна

Таблица 1

Main physical and mechanical parameters of grain

Table 1

Вид зерна (год урожая) <i>Type of grain (harvest year)</i>	Натура, г/см ³ <i>Grain unit, g/cm³</i>	Плотность зерновки, г/см ³ <i>Grain density, g/cm³</i>	Влажность, % <i>Moisture content, %</i>	Эквивалентный диаметр зерна, мм <i>Equivalent grain diameter, mm</i>
Пшеница (2022 г.) / <i>Wheat (2022)</i>	0,790	1,06	12,6	3,91
Ячмень (2022 г.) / <i>Barley (2022)</i>	0,720	1,14	13,6	4,41
Рожь (2019 г.) / <i>Rye (2019)</i>	0,806	1,06	14,8	3,87

Сила смятия постепенно снижается и в конце рабочего процесса уходит в ноль, кроме случая с ячменём. Это говорит о том, что в ячменной патоке остаются явные частицы, значение силы смятия которых в среднем составляет порядка 10 Н. Экспериментальные значения с высокой степенью адекватности описываются полиномиальными зависимостями:

$$F_{cm}(п) = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 - 0,006 \cdot \tau + 0,11; \quad (1)$$

$$F_{cm}(р) = 0,0001 \cdot \tau^2 - 0,0103 \cdot \tau + 0,2035; \quad (2)$$

$$F_{cm}(я) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^3 + 0,0003 \cdot \tau^2 - 0,0117 \cdot \tau + 0,2193. \quad (3)$$

Для пшеницы ($R^2 = 0,9999$) и ржи ($R^2 = 0,9853$) можно использовать полиномы 2 степени, для ячменя ($R^2 = 0,9996$) – полином 3 степени.

В качестве экспериментальной проверки проведён опыт приготовления ячменной патоки при использовании пассивного измельчителя со снятой решёткой. Как показывает график (рис. 3), кривая, описывающая процесс с применением решётки, находится ниже кривой силы смятия без решётки в среднем на 15%. Этот факт

подтверждает необходимость установки решётки, способствующей ускоренному процессу разрушения зерновки за счёт совокупности физических явлений истирания и деформации от удара. С точки зрения эксплуатации машины установка малозатратной решётки позволит увеличить ресурс насоса и в целом снизить энергозатраты на единицу корма. Гипотетически, с точки зрения физико-химических процессов, за счёт ускоренного разрушения зерновки увеличивается скорость набухания и клейстеризации, что приводит к превращению крахмала в легкодоступные сахара.

Другая часть отобранной пробы использовалась для определения плотности и кинематической вязкости. Графическое изображение зависимости между кинематической вязкостью и температурой показывает, что для всех случаев с повышением температуры вязкость растёт (рис. 4). Потенциал вязкости водно-ржаной смеси на участке температуры от 34 до 56°C выше, чем для водно-пшеничной и водно-ячменной смесей. Возможной причиной этого является отличительная особенность зерна ржи образовывать

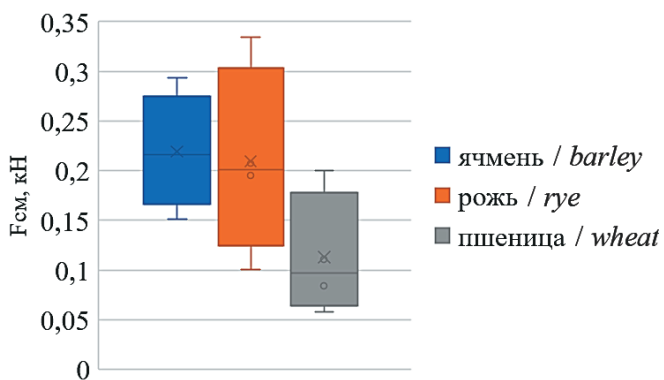


Рис. 2. Диаграмма размаха значений силы смятия исходных образцов зерна

Fig. 2. Scale diagram of the crumbling force values of initial grain samples

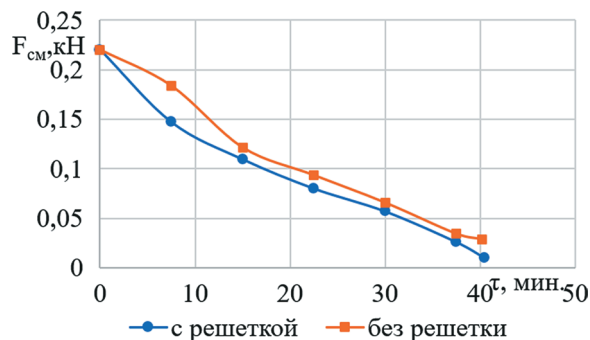


Рис. 3. Сила смятия зерновки ячменя в зависимости от времени циркуляции смеси в водяном контуре установки с пассивным измельчителем

Fig. 3. Barley grain crumbling force depending on the circulation time of the mixture in the water circuit of the installation with a passive grain crusher

Таблица 2
Среднее значение силы смятия зерновок в процессе производства зерновой патоки

Table 2
Average value of grain crumbling force after grain feeding into the process tank

Время τ , мин Time τ , min	Сила смятия F_{cm} , кН / Crumpling force F_{cm} , kN		
	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley	Рожь / Rye
0	0,1100	0,2200	0,2070
7,50	0,0690	0,1470	0,1210
15,00	0,0380	0,1100	0,0920
22,50	0,0137	0,0800	0,0250
30,00	0	0,0570	0,0070
31,50	-	-	0
37,50	-	0,0260	-
40,48	-	0,0100	-

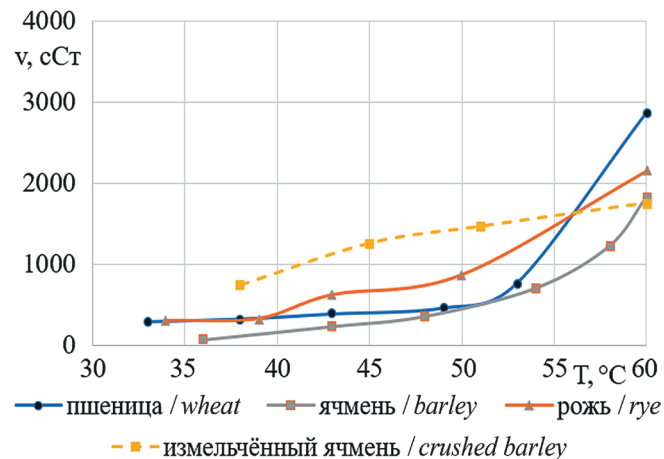


Рис. 4. Кинематическая вязкость водно-зерновой смеси
Fig. 4. Kinematic viscosity of water-grain mixture

слизеобразующие пентозаны при низких температурах [8]. Содержание водорастворимых моносахаридов типа ксилозы, влияющих на высокие показатели вязкости [9], в 2 раза выше в зерне ржи, чем в пшенице, и в несколько раз выше, чем в ячмене [10].

Вязкость для водно-пшеничной смеси носит также неоднозначный характер. Относительно медленный подъём вязкости наблюдался на участке температуры 33...53°C в связи с поглощением воды и постепенным набуханием крахмальных зерен [11]. После полного разрушения зерна наступает стадия клейстеризации крахмала с образованием малоподвижных мицелл, а следовательно, происходит повышение вязкости. Известно, что температура клейстеризации крахмала пшеницы наступает раньше и составляет 52...64°C, для ржи – от 55°C, а для ячменя – 61...62°C [10]. При 60°C вязкость водно-пшеничной смеси на 30% больше, чем вязкость водно-ржаной смеси. Вязкость водно-ячменной смеси возрастает более плавно и при 60°C составляет 1823 сСт, что на 57% меньше вязкости водно-пшеничной смеси, поскольку используемый ячмень имел цветковую оболочку, которая трудно гидролизуется ферментами². Однако экспериментальной проверкой установлено, что при использовании в качестве зернового компонента измельчённого ячменя со средневзвешенным диаметром частиц 1,39 мм стартовая кинематическая вязкость водно-ячменной смеси по сравнению со смесью, где использован целый ячмень, в 10 раз выше. Но в конце рабочего цикла при 60°C вязкость между данными группами отличается несущественно – всего на 4%.

Во всех случаях полученные смеси можно отнести к неньютоновским реопектантным жидкостям. Основными факторами, влияющими на вязкость во время эксперимента, являлись температура, физико-механическое воздействие, скорость сдвига, время, а также состав смеси. Роль физико-механического воздействия на белки и полипептиды, вызывающего изменение их структуры, свойств, активность фермента, показана в исследованиях А.М. Дубинской [12].

Текущая смесь φ (сП⁻¹) как величина, обратно пропорциональная динамической вязкости, в процессе приготовления зерновой патоки снижается (рис. 5). Определение такого параметра имеет практическую ценность, и его нужно учитывать в технологии производства патоки. От первого замера текущая водно-ячменной смеси снижается в 26 раз (с $13,36 \cdot 10^{-3}$ до $0,519 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹), для водно-пшеничной смеси – в 10 раз (с $3,21 \cdot 10^{-3}$ до $0,326 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹), для водно-ржаной смеси – в 6 раз (с $2,87 \cdot 10^{-3}$ до $0,465 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹). Как видим, пшеничная патока на момент приготовления обладает минимальной текущей.

² Тетяников Н.В., Боме Н.А. Генетические ресурсы ячменя и их использование в селекции: Монография. М., 2022. 215 с.

Заключительным этапом исследований являлось определение кинетики процесса вязкости в постферментации на момент выхода готового продукта – зерновой патоки. В случае с пшеничной и ячменной патокой процесс ферментации благоприятно влияет на увеличение вязкости и имеет выраженный постэффект (рис. 6). Так, кинематическая вязкость возрастает для пшеничной патоки с 2862 до 7820 сСт (практически в 2,7 раза) с уменьшением текучести до $0,129 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹, для ячменной – на 60% с уменьшением текучести до $0,3 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹.

Уникальной особенностью ржаной патоки в пост-ферментации являлось снижение вязкости на 20% – до 1788 сСт, а текучесть увеличивалась до $0,53 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹. По мнению Л.А. Кушнерук [13], такое свойство объясняется происходящими процессами внутри белковых мицелл по перераспределению связанной воды между молекулами сахара и белка. Причины этого явления окончательно не установлены.

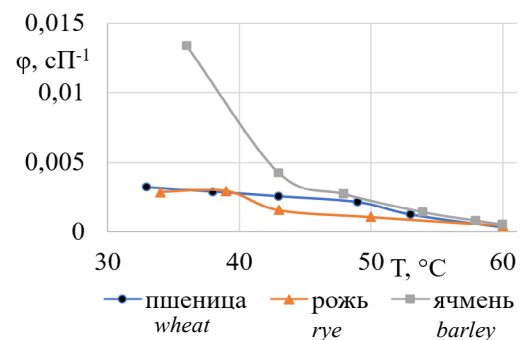


Рис. 5. Текущая водно-зерновой смеси
Fig. 5. Fluidity of water-grain mixture

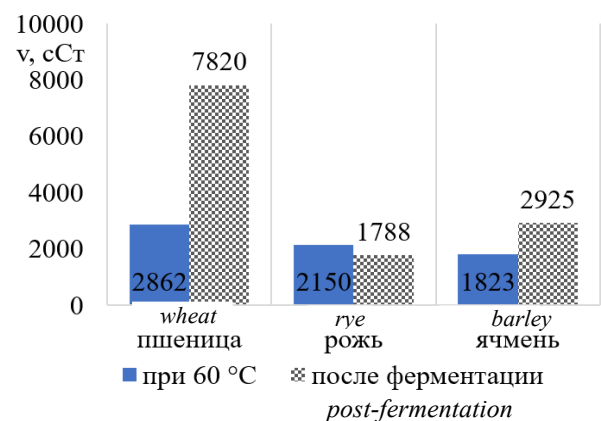


Рис. 6. Кинематическая вязкость на момент окончания циркуляции смеси и в постферментации
Fig. 6. Kinematic viscosity at the end of the mixture circulation and in post-fermentation

Выводы

1. Использование решётки в пассивном измельчителе благоприятно влияет на разрушение зерна и процесс производства зерновой патоки.

2. При производстве ячменной патоки рекомендуется загружать зерно в технологическую ёмкость либо предварительно измельчённым, либо целым при температуре воды менее 30°C.

3. При производстве пшеничной патоки, обладающей слабой текучестью ($0,129 \cdot 10^{-3}$ сП⁻¹), необходимо

уменьшать концентрацию зерна за счёт изменения процентного соотношения зерна к воде при загрузке или добавления воды в конце рабочего процесса. Это является задачей последующих исследований.

4. Для ржаной патоки в период постферментации необходимо учитывать эффект снижения вязкости на 20%.

Список использованных источников

1. Мищенко В.А., Мищенко А.В., Ермилов И.В., Черных О.Ю., Якубенко Е.В., Думова В.В. Анализ нарушений обмена веществ у высокоудойных коров // Ветеринария Кубани. 2012. № 6. С. 15-17. EDN: PNFBVT.

2. Сизова Ю.В., Булатов С.Ю., Нечаев В.Н. Приготовление зерновой патоки из зерна // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. № 4 (67). С. 143-146. EDN: NSVEJV.

3. Аксёнов В.В. Переработка зерна ржи и пшеницы на кормовые углеводные добавки и их использование в рационах лактирующих коров // Вестник КрасГАУ. 2007. № 1. С. 184-186. EDN: HBWZSC.

4. Шлейкин А.Г., Баракова Н.В., Петрова М.Н., Данилов Н.П., Аргымбаева А.Е. Влияние сахарного сиропа, мёда и злаков на реологические свойства йогурта // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. № 2. С. 24-34. EDN: TWCWBD.

5. Сергеев А.Г., Савиных П.А., Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Шамин А.Е. Малозатратная установка для производства зерновой патоки // Сельский механизатор. 2020. № 5-6. С. 26-27. EDN: BWPXHD.

6. Marczuk A., Misztal W., Bulatov S., Nechayev V., Savinykh P. Research on the work process of a station for preparing forage. *Sustainability*. 2020;12(3):1050. <https://doi.org/10.3390/su12031050>

7. Чикина Е.Ю., Злочевский В.Л. Энергия сжатия зерновки при площении // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 7 (81). С. 93-96. EDN: NUOSTP.

8. Бахитов Т.А., Челнокова Е.Я., Зайцева Л.В., Колпакова В.В. Ресурсосберегающие способы переработки зерна ржи // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 5-6. С. 49-52. EDN: JVXPID.

9. Гончаренко А.А., Тимошенко А.С. Сравнительная оценка сортов зерновых культур по вязкости водного экстракта и структуре водорастворимых пентозанов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2007. № 1. С. 60-61. EDN: HYLKBB.

10. Васильева А.А., Парамонов Т.А., Панова Т.М. Совершенствование технологии пивного сула с повышенной дозировкой несоложенного сырья // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2020. № 1. С. 18-27. EDN: STDZHB.

11. Холманский А.С., Сидоренко А.С. Зависимость кинетики набухания семян от температуры // Физико-химический анализ свойств многокомпонентных систем. 2008. № 6. С. 8. EDN: KTZJHT.

12. Dubinskaya A.M. Transformations of organic compounds under the action of mechanical stress // Успехи химии. 1999. № 68 (8). С. 722-724. EDN: MPDECN.

13. Бахитов Т.А. Ресурсосберегающие технологии хлеба и комбикормов с использованием продуктов ферментативного гидролиза зерна ржи // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 9 (59). С. 279-283. EDN: RBOLTR.

References

1. Mishchenko V.A., Mishchenko A.V., Ermilov I.V., Chernyh O. Yu., Yakubenko E.V., Dumova V.V. Analysis of metabolic disorders in high-yielding cows. *Veterinariya Kubani*. 2012;6:15-17. (In Rus.)

2. Sizova Yu.V., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N. Preparation of grain molasses from grain. *The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2021;4(67):143-146. (In Rus.)

3. Aksenov V.V. Processing of grain of a rye and wheat on feed carbohydrate additives and their use in diets of the lactating cows. *Bulletin of KSAU*. 2007;1:184-186. (In Rus.)

4. Shlenkin A.G., Barakova N.V., Petrova M.N., Danilov N.P., Argymbaeva A.E. Influence of sugar syrup, honey and cereals on the rheological properties of yogurt. *Scientific Journal of ITMO University. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2015;2:24-34. (In Rus.)

5. Sergeev A.G., Savinykh P.A., Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Shamin A.E. Low-cost grain molasses plant. *Selskiy mekhanizator*. 2020;5-6:26-27. (In Rus.)

6. Marczuk A., Misztal W., Bulatov S., Nechayev V., Savinykh P. Research on the work process of a station for preparing forage. *Sustainability*. 2020;12(3):1050. <https://doi.org/10.3390/su12031050>

7. Chikina E.Yu., Zlochevskiy V.L. Energy of grain compression during flattening. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011;7(81):93-96. (In Rus.)

8. Bakhitov T.A., Chelnokova E.Ya., Zaytseva L.V., Kolpakova V.V. Resource-saving ways of processing rye grain. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2008;5-6:49-52. (In Rus.)

9. Goncharenko A.A., Timoshchenko A.S. Comparative evaluation of grain crop varieties by the viscosity of the aqueous extract and the structure of water-soluble pentosans. *Vestnik Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk*. 2007;1:60-61. (In Rus.)

10. Vasilieva A.A., Paramonov T.A., Panova T.M. Improvement of beer wort technology with an increased share of unsalted raw materials. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2020;1:18-27. (In Rus.)

11. Kholmanskiy A.S., Sidorenko A.S. Dependence of the kinetics of seed swelling on the temperature. *Fiziko-khimicheskiy analiz svoystv mnogokomponentnykh sistem*. 2008;6:8. (In Rus.)

12. Dubinskaya A.M. Transformations of organic substances under the action of mechanical stresses. *Uspekhi khimii*. 1999;68(8):708-724. (In Rus.)

13. Bakhitov T.A. Resource-saving technologies of bread and compound feed making with the use of enzymatic rye grain hydrolysis products. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2006;9:279-283. (In Rus.)

Статья поступила в редакцию 11.03.2023, после рецензирования и доработки 06.07.2023, принята к публикации 10.07.2023

Received 11.03.2023; revised 06.07.2023; accepted 10.07.2023