






Оптимизация водно-тепловой обработки ячменного замеса в производстве этанола






Геннадий В. Агафонов	¹	gvagafonov@mail.ru	 0000-0002-2133-5606
Татьяна С. Ковалева	¹	tanyakova2501@gmail.com	 0000-0002-3531-3811
Алексей Н. Яковлев	¹	vip.alex2702@mail.ru	 0000-0002-3246-6628
Александр С. Муравьев	¹	hntun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752
Светлана Ф. Яковлева	¹	svetlana.yakovleva.68@mail.ru	 0000-0003-3686-9966

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Ячмень является проблемным сырьем для переработки в этанол. Это связано с его химическим составом. Высокое содержание β -глюканов и пентозанов повышает вязкость массы и потери перевариваемых углеводов на стадии водно-тепловой обработки. Ферменты, используемые для предварительной обработки зерна перед ферментацией, традиционно являются α -амилазами и глюкоамилазами. Цель работы – определить оптимальное соотношение ферментов, вносимых в различные периоды водно-тепловой обработки. Объектом исследования являлся ячмень: крахмал 52, белок 11,5, гемицеллюлозы 5,1, β -глюкан 3,9, влажность 14,0. Применяли ферментные препараты Alphaferm 3500L (0,5–1,0 AC/г крахмала), ViscoStar 150L (3700 ед. KC/см³; 140 ед. β -ГКС/см³; 1900 ед. КМЦ/см³), Prolyve BS Liquid (600–750 ед. ПС/см³). Исследована динамика изменения вязкости в процессе водно-тепловой обработки. Установлено, что на массовую долю сухих веществ в фильтрате ячменного замеса наибольшее влияние оказывает дозировка ферментного препарата Alphaferm 3500L, меньшее и близкое по значению влияние – дозировка других ферментных препаратов и продолжительность эксперимента. Показано, что применение мультиферментного комплекса снижает вязкость на 82% по сравнению с контролем. Для определения оптимального режима водно-тепловой обработки был использован метод неопределенных множителей Лагранжа. Установлено, что максимальное накопление сухих веществ в смеси составляет 16,4% и достигается через 2,5 часа при следующих дозах ферментных препаратов: Alphaferm 3500 L – 0,6 ед. AC/г крахмала; ViscoStar 150L – 0,025 ед. ГКС/г крахмала; Prolyve BS Liquide 0,25 ед. ПС/г крахмала.

Ключевые слова: ячмень, вязкость, оптимизация, этанол, водно-тепловая обработка

Optimization of water-heat treatment of barley batch (mix) in ethanol production

Gennadiy V. Agafonov	¹	gvagafonov@mail.ru	 0000-0002-2133-5606
Tatyana S. Kovaleva	¹	tanyakova2501@gmail.com	 0000-0002-3531-3811
Aleksey N. Yakovlev	¹	vip.alex2702@mail.ru	 0000-0002-3246-6628
Aleksandr S. Muravev	¹	hntun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752
Svetlana F. Yakovleva	¹	svetlana.yakovleva.68@mail.ru	 0000-0003-3686-9966

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Barley is a problematic raw material for ethanol processing due to its chemical composition. β -glucans and pentosans high content increases the mass viscosity and digestible carbohydrates loss at epy water-heat treatment stage. The enzymes used to pre-treat grain prior to fermentation are traditionally α -amylases and glucoamylases. The purpose of the work is to determine the optimal ratio of enzymes introduced in different periods of water-heat treatment. The object of study was barley: starch 52, protein 11.5, hemicellulose 5.1, β -glucan 3.9, moisture 14.0. Enzyme preparations Alphaferm 3500L (0.5–1.0 AC / g starch), ViscoStar 150L (3700 units KS / cm³; 140 units β – GcS / cm³; 1900 units CMC / cm³), Prolyve BS Liquid (600-750 units PS / cm³) were used in the work. The dynamics of viscosity change in the process of water-heat treatment was investigated in the work as well. It was found out that the dosage of the enzyme preparation Alphaferm 3500L has the greatest effect on the mass fraction of dry substances in the filtrate of barley mix, while the dosage of other enzyme preparations and the duration of the experiment have a smaller and similar effect. It was proved that the application of a multienzyme complex reduces the viscosity by 82% compared to the control. The method of indefinite Lagrange multipliers was used to determine the optimal mode of water-heat treatment. It was found out that the maximum accumulation of dry substances in the mixture is 16.4% and is achieved after 2.5 hours with the following doses of enzyme preparations: Alphaferm 3500 L - 0.6 units. AC / g starch; ViscoStar 150L - 0.025 units GCS / g starch; Prolyve BS Liquide 0.25 units PS / g starch.

Keywords: barley, viscosity, optimization, ethanol, water-heat treatment

Для цитирования

Агафонов Г.В., Ковалева Т.С., Яковлев А.Н., Муравьев А.С., Яковлева С.Ф. Оптимизация водно-тепловой обработки ячменного замеса в производстве этанола // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 3. С. 131–138. doi:10.20914/2310-1202-2020-3-131-138

For citation

Agafonov G.V., Kovaleva T.S., Yakovlev A.N., Muravev A.S., Yakovleva S.F. Optimization of water-heat treatment of barley batch (mix) in ethanol production. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 131–138. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-3-131-138

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), ежегодно в мире производится около 141,1 млн тонн ячменя, производство в Европе составляет 63% от общего объема, и России – 8% [1].

Ячмень содержит в среднем 63–65% крахмала, 8–13% белка, 2–3% жира, 1–1,5% растворимых десен, 8–10% гемицеллюлозы, около 2,9% лигнина и 2–2,5% золы [2, 3]. Ячмень также содержит оболочку, которая может быть гидролизована с использованием целлюлозных ферментов. Потенциальные сопутствующие продукты производства этанола из ячменя включают белок, клетчатку, жирные кислоты, токоферолы и токотриенолы [4]. Питательная ценность ячменя, основанная на содержании аминокислот, выше, чем у кукурузы, и не подвергается значительному влиянию процесса ферментации [4]. Ряд нутрицевтиков и функциональных пищевых продуктов, а также амилазы, ингибиторы амилазы, α -амилазы и оксалат-оксидазы содержатся в зернах ячменя и потенциально доступны для извлечения и коммерческого применения [5–7].

Ферменты, используемые для предварительной обработки зерна перед ферментацией, традиционно являются α -амилазами и глюкоамилазами. Амилаза снижает вязкость суслу [8] и выполняет сжижение в процессе предварительной обработки. Этап сжижения обычно происходит при высоких температурах от 100 до 120 °C [9] с прямым впрыском пара. Действие α -амилазы служит для разрушения α -(1,4)-глюкозидных связей крахмала, образуя более мелкие цепочки декстринов. Во время этапа сахарификации декстрины подвергаются действию глюкоамилазы.

В отличие от пшеницы, ячмень является проблемным сырьем для переработки в спирт. Это связано с его химическим составом. Высокое содержание β -глюканов и пентозанов повышает вязкость массы и потери перевариваемых углеводов на стадии водно-тепловой обработки (ВТО), а значит требует снижения концентрации суслу до 14,5–16,5%, что повышает стоимость конечного продукта [10, 13–15].

Ранее показана положительная динамика в снижении вязкости ячменных замесов при их обработке ферментными комплексами ViscoStar 150L (на 50%), Alphaferm 3500L (на 48%) и Prolyve BS Liquide (на 32%) [11, 12].

В связи с этим целью работы – определить оптимальное соотношение ферментов, вносимых в различные периоды водно-тепловой обработки.

Материалы и методы

В качестве объектов использовали ячмень следующего состава (%): крахмал 52, белок 11,5, гемицеллюлозы 5,1, β -глюкан 3,9, влажность 14,0. Степень шлифования 75–80 и 95–100%.

Во время ВТО использовались ферментные препараты Alphaferm 3500L (0,5–1,0 АС/г крахмала), ViscoStar 150L (3700 ед. КС/см³; 140 ед. β -ГКС/см³; 1900 ед. КМЦ/см³), Prolyve BS Liquid (600–750 ед. ПС/см³).

Активности ферментов определяли по стандартным методикам.

Подготовка замеса осуществлялась путем ВТО измельченного зерна ячменя с водой в соотношении 1:3 при 45–50 °C. В качестве ферментных препаратов использовали AlphaFerm 3500L (0,5–1,0 ед. АС/г крахмала) и Prolyve BS liquid (0,2 ед. ПС/г крахмала).

BrewZyme BGX, Shearzim 500L и ViscoStar 150L были использованы для расщепления некрахмальных полисахаридов в оболочках ячменя. Ферментные препараты вводились в смесь и выдерживались в течение 40 минут при температуре 50 °C с последующим нагревом со скоростью 1,0–1,5 °C/мин до температуры 95 °C. В процессе нагрева значение вязкости устанавливалось для каждого повышения температуры на 5 °C. Для предотвращения подкисления используется формальдегид. Паузы осахаривания проводили от 30 до 120 минут.

Определение вязкости ячменных замесов проводили на ротационном вискозиметре «Реотест-2».

Редуцирующие сахара определяли методом Сомоджи–Нельсона.

Количественное содержание глюкозы определяли глюкозооксидазным методом с применением гексацианоферрата калия (II).

Математическая обработка экспериментальных данных. Применяли метод полного факторного эксперимента 2⁴ и центральное композиционное ротатабельное униформпланирование эксперимента. Для определения оптимального режима ВТО был использован метод множителей Лагранжа. Для оценки адекватности математической модели был проведен дисперсионный анализ в программе Design Expert (Stat-Ease Inc.). Все эксперименты проводили с 3-х кратной повторностью. Таблицы и рисунки представляют данные типичных опытов.

Результаты и обсуждение

Исследована динамика изменения вязкости в процессе ВТО. Кривая изменения вязкости (рисунок 1) с использованием мультиферментативного комплекса имеет S-образную форму,

ее можно разделить на 3 секции. В первой секции (до 20 минут) вязкость существенно не меняется, со скоростью 0,01 Па×с/мин.

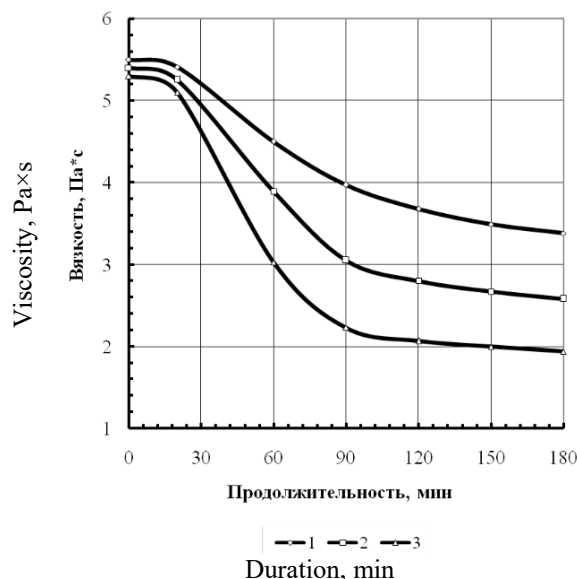


Рисунок 1. Динамика изменения вязкости в процессе ВТО: 1 – Alphaferm 3500L (0,5 ед. АС/г крахмала); 2 – Alphaferm 3500L (1,0 ед. АС/г крахмала); 3 – Alphaferm 3500L (0,5 ед. АС/г крахмала), ViscoStar 150L (0,02 ед. β-ГКС/г крахмала), Proluve BS Liquide (0,2 ед. ПС/г крахмала)

Figure 1. Dynamics of viscosity change during water and heat treatment: 1 – Alphaferm 3500L (0.5 AA); 2 – Alphaferm 3500L (1.0 AA); Alphaferm 3500L (0.5 AA); 3 – Alphaferm 3500L (0.5 AA), ViscoStar 150L (0.02 Gx), Proluve BS Liquide (0.2 PA)

При повышении степени гидролиза крахмала, полисахаридов, отличных от крахмала и белков, до низко-молекулярных фракций во второй секции (20–90 мин) вязкость существенно снижается. Здесь наблюдается максимальная скорость процесса – 0,04 Па×с/мин. В 3-ей секции (90–180 мин), достигнув максимума, практически не изменяется, что, вероятно, связано с более полным гидролизом перечисленных выше веществ, вызывающих вязкость смеси.

Применение ферментного комплекса позволяет нагревать смесь до повышенной температуры и поддерживать ее в течение необходимого времени в технологическом режиме. Вязкость массы не увеличивается с охлаждением. Это указывает на то, что крахмал перешел в растворенную форму и не восстанавливается при охлаждении. Такая масса хорошо подготовлена для осахаривания.

В эксперименте использовались следующие контролируемые факторы: X_1 – дозировка ферментного препарата Alphaferm 3500L,

ед. АС/г крахмала; X_2 – дозировка ферментного препарата ViscoStar 150L, см³/кг крахмала; X_3 – дозировка ферментного препарата Proluve BS Liquide, ед. ПС/г крахмала; X_4 – продолжительность эксперимента, ч.

Диапазоны изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1. Критерием оценки влияния различных факторов на качество ячменной смеси является массовая доля СВ в ее фильтрате после ВТО.

Математическая модель изучаемого процесса представляется в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

Для оценки адекватности математической модели с помощью ПО Design Expert (Stat-EaseInc.) был проведен дисперсионный анализ (ANOVA) эксперимента и получено следующее уравнение регрессии:

$$y_1 = 15,12 + 0,41x_1 + 0,17x_2 + 0,16x_3 + 0,18x_4 + 0,06x_1x_2 + 0,01x_1x_3 - 0,03x_1x_4 + 0,04x_2x_3 - 0,02x_2x_4 + 0,05x_3x_4 - 0,01x_1^2 - 0,07x_2^2 - 0,05x_3^2 - 0,07x_4^2 \quad (2)$$

Таблица 1.

Изменение исследуемых факторов

Table 1.

Varying of factors

Условия планирования Conditions	Пределы изменения исследуемых факторов Limits of factors			
	x_1 , ед., АС/г крахмала	x_2 , ед. ГКС/г крахмала	x_3 , ед. ПС/г крахмала	x_4 , ч
Основной уровень Basic level	0,5	0,02	0,20	2,0
Верхний уровень Upper level	0,6	0,025	0,25	2,5
Нижний уровень Lower level	0,4	0,015	0,15	1,5
Верхняя звездная точка Upper stellar point	0,7	0,03	0,30	3,0
Нижняя звездная точка Lower stellar point	0,3	0,01	0,10	1,0

Из уравнения (2) видно, что на массовую долю сухих веществ в фильтрате ячменного замеса наибольшее влияние оказывает дозировка ферментного препарата Alphaferm 3500L, меньшее и близкое по значению влияние – дозировка других ФП и продолжительность эксперимента. Знак плюс перед коэффициентом X указывает на то, что значение выходного параметра Y увеличивается с увеличением значения X , а знак минус уменьшается с уменьшением значения параметра. Графическое представление этой зависимости представлено на рисунке 2.

Графическая интерпретация уравнения (2) представлена кривыми равных значений для входных параметров в диапазоне $[-2 \ +2]$. Эти графики несут значение номограмм и имеют практическое значение. Зная значение параметров, можно спрогнозировать процесс водо-тепловой обработки сырья.

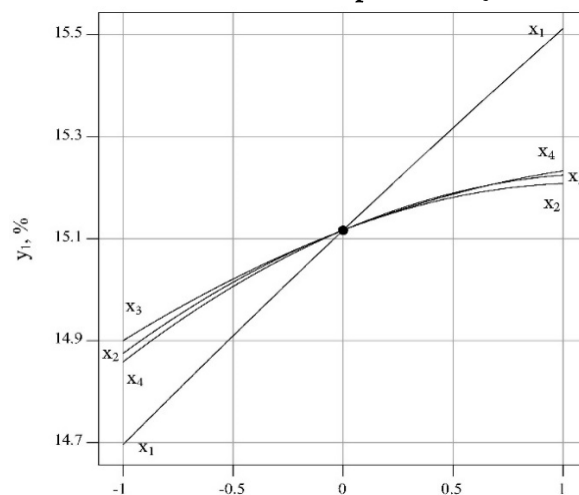


Рисунок 2. Влияние входных параметров X_i на массовую долю сухих веществ в фильтрате ячменного замеса

Figure 2. Effect of input parameters on mass fraction of dry matter in barley filtrate

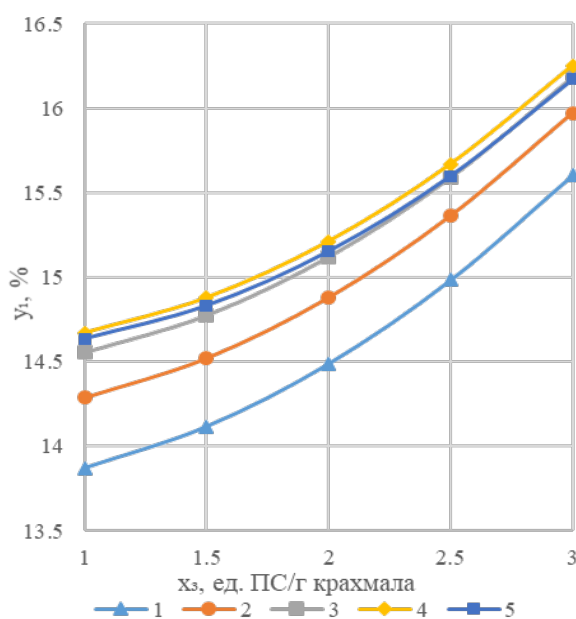


Рисунок 3. Зависимость массовой доли сухих веществ в фильтрате ячменного замеса от дозировки ферментного препарата Prolyve BS Liquide, ед. ПС/г крахмала при продолжительности эксперимента, ч: 1–1; 2 – 1,5; 3 – 2; 4–2,5; 5–3

Figure 3. Dependence of the mass fraction of dry matter in the filtrate of barley mixture on the dosage of Prolyve BS Liquide, on the amount of dry matter in the barley mixture. PS/g starch at experiment duration, h: 1 – 1; 2 – 1,5; 3 – 2; 4 – 2,5; 5 – 3

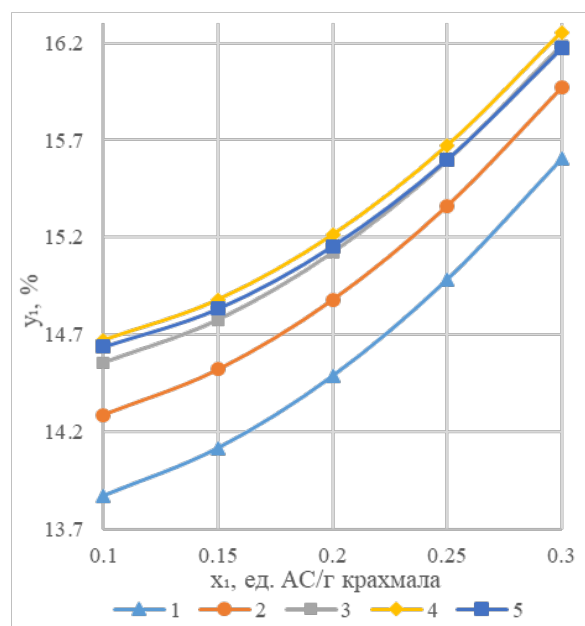


Рисунок 4. Зависимость массовой доли сухих веществ в фильтрате ячменного замеса от дозировки ФП Alphaferm 3500L, ед. АС/г крахмала при дозировке ФП ViscoStar 150L, ед. ГкС/г: 1–0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,2; 4 – 0,25; 5 – 0,3

Figure 4. Dependence of the mass fraction of dry matter in the filtrate of barley mixture on the dosage of Alphaferm 3500L, at a dosage of ViscoStar 150L, unit. Gx/g: 1 – 0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,2; 4 – 0,25; 5 – 0,3

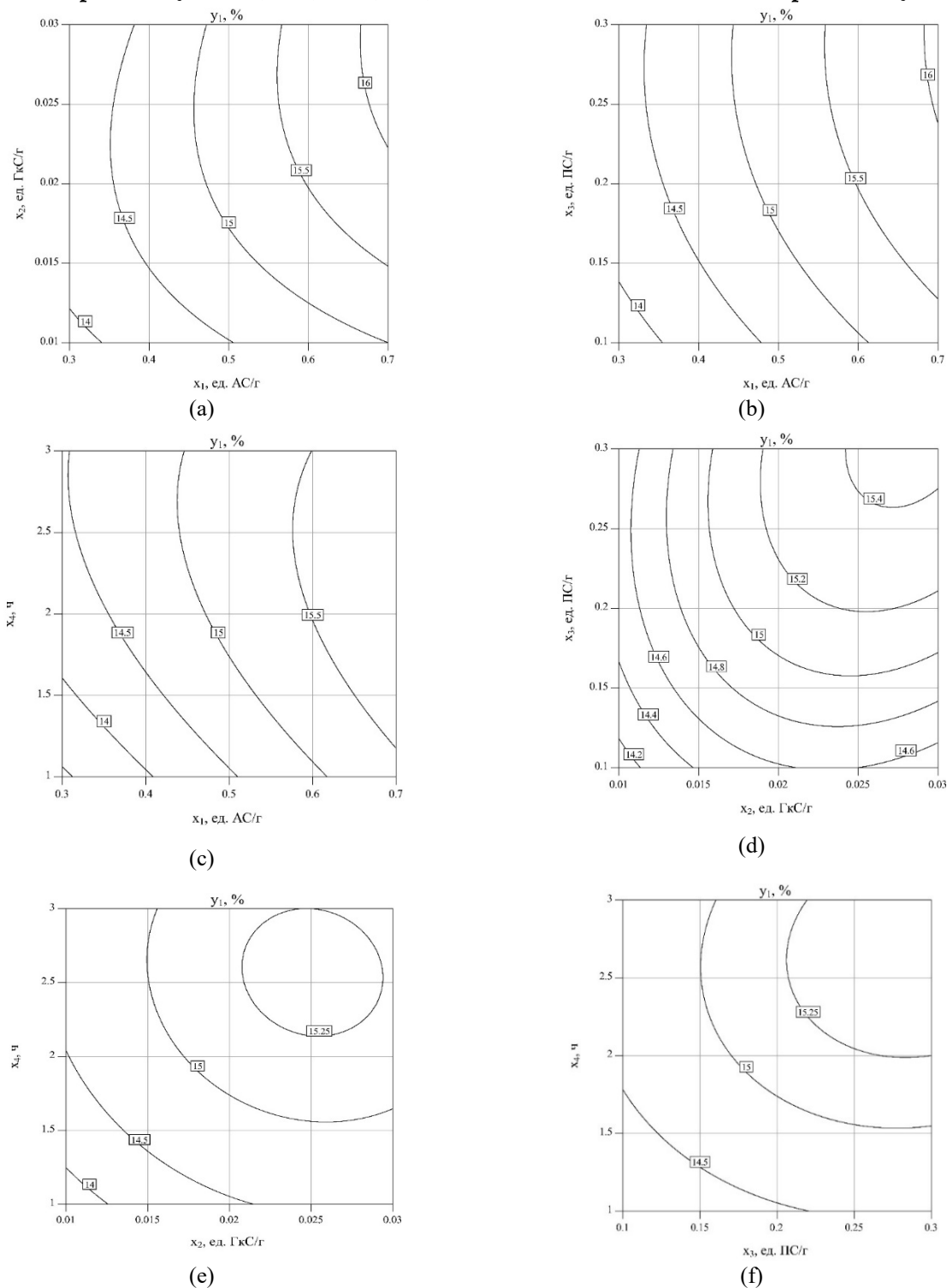


Рисунок 5. Кривые равных значений зависимости массовой доли сухих веществ в фильтрате ячменного замеса от (a) дозировки ФП Alphaferm 3500L, ед. AC/g крахмала и ФП ViscoStar 150L, ед. ГКС/g крахмала; (b) дозировки ФП Alphaferm 3500L, ед. AC/g крахмала и ФП Prolyve BS Liquide, ед. ПС/g крахмала; (c) дозировки ФП Alphaferm 3500L, ед. AC/g крахмала и продолжительности эксперимента, ч; (d) дозировки ФП ViscoStar 150L, ед. ГКС/g крахмала и ФП Prolyve BS Liquide, ед. ПС/g крахмала; (e) дозировки ФП ViscoStar 150L, ед. ГКС/g крахмала и продолжительности эксперимента, ч; (f) дозировки ФП Prolyve BS Liquide, ед. ПС/g крахмала и продолжительности эксперимента, ч

Figure 5. Curves of equal values of the dependence of the mass fraction of dry substances in the filtrate of barley mixture on (a) dosage of FP Alphaferm 3500L, units. AC / g starch and FP ViscoStar 150L, units GCS / g starch; (b) dosage of FP Alphaferm 3500L, units. AC / g starch and FP Prolyve BS Liquide, unit PS / g starch; (c) dosages of FP Alphaferm 3500L, units. AC / g starch and duration of the experiment, h; (d) dosage of FP ViscoStar 150L, units. GCS / g starch and FP Prolyve BS Liquide, units PS / g starch; (e) dosage of FP ViscoStar 150L, units. GCS / g starch and duration of the experiment, h; (f) dosage of FP Prolyve BS Liquide, units. PS / g starch and duration of the experiment, h

Предложены численные и графические методы оптимизации для прогнозирования оптимального уровня исходных факторов и получения максимального значения массовой доли сухого вещества в фильтрате. Общее математическое изложение задачи оптимизации представлено в виде следующей модели:

$$y_1(x_1 \dots x_j) \rightarrow \max.$$

Для решения оптимизационной задачи определено значение функции желательности ($D \rightarrow 1,0$) для поиска диапазонов оптимальных значений входных параметров, получено более 15 решений, приведем первые 5:

Таблица 2.
Решения задачи оптимизации

Table 2.
Solutions of optimization task

x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	D
0,600	0,025	0,250	2,487	15,9	0,947
0,592	0,021	0,259	1,977	15,4	0,921
0,620	0,028	0,252	1,599	15,2	0,854
0,579	0,023	0,260	3,093	15,1	0,899
0,596	0,027	0,251	3,011	14,9	0,895

Из таблицы определим оптимальные интервалы X для получения максимального значения массовой доли сухого вещества в фильтрате ячменного замеса: $x_1 = 0,596-0,60$ ед. АС/г крахмала; $x_2 = 0,021-0,028$ ед. ГкС/г крахмала; $x_3 = 0,25-0,26$ ед. ПС/г крахмала; $x_4 = 1,6-3,1$ ч.

Окончательно принимаем следующее значение выходного параметра $y = 15,9\%$ ($D = 0,947$), при соответствующих входных: $x_1 = 0,6$ ед. АС/г крахмала; $x_2 = 0,025$ ед. ГкС/г крахмала; $x_3 = 0,25$ ед. ПС/г крахмала; $x_4 = 2,5$ ч.

Параллельно был проведен ряд экспериментов для проверки правильности выбора оптимальных условий ВТО. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показало достаточную конвергенцию результатов. Все полученные

данные находились в пределах расчетных доверительных интервалов параметров оптимизации. Среднеквадратическая погрешность не превышала 4,71%.

При полученных оптимальных условиях осуществлялся процесс ВТО. По окончании процесса были отобраны и проанализированы пробы. Результаты обобщены в таблице 3.

Таблица 3.
Свойства замеса после ВТО

Table 3.
Properties of barley mix

Показатель Indicator	Контроль Control	Опыт Exp
Массовая доля СВ, %. Dry matter, %	14,6	16,4
Содержание ред. в-в, г/100 см ³ Contents of reductants	6,5	9,1
pH	6,2	6,1
Кислотность, град Acidity, deg	0,15	0,28
Вязкость, Па×с Viscosity, Pa×s	3,2	2,2

Заключение

Установлено, что применение мультиферментного комплекса снижает вязкость на 82% по сравнению с контролем.

Получено уравнение регрессии 2-го порядка, адекватно описывающее процесс механической и ферментативной обработки замеса, подтверждающее выбранные оптимальные условия.

Для определения оптимального режима ВТО был использован метод неопределенных множителей Лагранжа. Установлено, что максимальное накопление сухих веществ в смеси составляет 16,4% и достигается через 2,5 часа при следующих дозах ферментных препаратов: Alphaferm 3500 L – 0,6 ед. АС/г крахмала; ViscoStar 150L – 0,025 ед. ГкС/г крахмала; Prolyve BS Liquide 0,25 ед. ПС/г крахмала.

Литература

- 1 Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO). URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- 2 Kim S., Dale B. E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues // *Biomass Bioenerg.* 2004. V. 26. P. 361–375.
- 3 Наумкин Д. В., Сидоренко В. С. Определение химического состава биомассы у сортов ярового ячменя // *Фундаментальные основы управления продукционным процессом для повышения экономической и энергетической эффективности АПК.* 2019. С. 83-85.
- 4 Weiss W.P., Erikson D.O., Erikson M., Fisher G.R. Barley distillers grains as a protein supplement for dairy cows // *J. Dairy Sci.* 1989. V. 72. P. 980–987.
- 5 Otles S., Cagindi O. Cereal-based functional foods and nutraceuticals // *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* 2006. V. 5. P. 107–112.
- 6 Georg-Kraemer J.E., Mundstock E.C., Cavalli-Molina S. Developmental expression of amylases during barley malting // *J. Cereal Sci.* 2001. V. 33. P. 279–288.
- 7 Thomas K.C., Ingledew W.M. Relationship of low lysine and high arginine concentrations to efficient ethanolic fermentation of wheat mash // *Can. J. Microbiol.* 1992. V. 38. P. 626–634.


- 8 Park J.T., Rollings J.E. Effects of substrate branching characteristics on kinetics of enzymatic depolymerization of mixed linear and branch polysaccharides. I. Amylose/amylopectin-amyolysis // *Biotechnol. Bioeng.* 1994. V. 44. P. 792–800.
- 9 Wang P., Singh V., Xue H., Johnston D.B. et al. Comparison of raw starch hydrolyzing enzyme with conventional liquefaction and saccharification enzymes in dry-grind corn processing // *Cereal Chem.* 2007. V. 84. P. 10–14.
- 10 Яковлев А.Н. и др. Применение мультиэнзимного комплекса при получении этилового спирта из проблемного сырья // *Вестник ВГУИТ.* 2012. № 3. С. 148-152.
- 11 Яковлев А.Н. и др. Влияние мультиэнзимной композиции на процесс брожения ржаного сусла // *Производство спирта и ликероводочных изделий.* 2013. № 3. С. 26-28.
- 12 Толгурова А.А., Хоконова М.Б. Научно-технологические аспекты ресурсосберегающей технологии в спиртовом производстве // *Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность.* 2018. С. 170-174.
- 13 Зуева Н.В. и др. Выбор ферментных препаратов и температурно-временных режимов водно-тепловой и ферментативной обработки при разработке комплексной технологии переработки зернового сырья // *Вестник ВГУИТ.* 2019. Т. 81. №. 1 (79).
- 14 Полонский В.И. и др. Оценка содержания антиоксидантов в зерне ячменя и овса на основе его физических показателей // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета.* 2016. № 8.
- 15 Jeon H. et al. Improvement of the Bioethanol Productivity from Debranned Barley // *Transactions of the Korean hydrogen and new energy society.* 2018. V. 29. №. 6. P. 648-653.

References


- 1 Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO). Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- 2 Kim S., Dale B.E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenerg.* 2004. vol. 26. pp. 361–375.
- 3 Naumkin D.V., Sidorenko V.S. Determination of the chemical composition of biomass in spring barley varieties. Fundamental principles of production process management to improve the economic and energy efficiency of the agro-industrial complex. 2019. pp. 83-85. (in Russian).
- 4 Weiss W.P., Erikson D.O., Erikson M., Fisher G.R. Barley distillers grains as a protein supplement for dairy cows. *J. Dairy Sci.* 1989. vol. 72. pp. 980–987.
- 5 Otles S., Cagindi O. Cereal-based functional foods and nutraceuticals. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* 2006. vol. 5. pp. 107–112.
- 6 Georg-Kraemer J.E., Mundstock E.C., Cavalli-Molina S. Developmental expression of amylases during barley malting. *J. Cereal Sci.* 2001. vol. 33. pp. 279–288.
- 7 Thomas K.C., Ingledew W.M. Relationship of low lysine and high arginine concentrations to efficient ethanolic fermentation of wheat mash. *Can. J. Microbiol.* 1992. vol. 38. pp. 626–634.
- 8 Park J.T., Rollings J.E. Effects of substrate branching characteristics on kinetics of enzymatic depolymerization of mixed linear and branch polysaccharides. I. Amylose/amylopectin-amyolysis. *Biotechnol. Bioeng.* 1994. vol. 44. pp. 792–800.
- 9 Wang P., Singh V., Xue H., Johnston D.B. et al. Comparison of raw starch hydrolyzing enzyme with conventional liquefaction and saccharification enzymes in dry-grind corn processing. *Cereal Chem.* 2007. vol. 84. pp. 10–14.
- 10 Yakovlev A.N. et al. The use of a multi-enzyme complex in the production of ethyl alcohol from problematic raw materials. *Proceedings of VSUET.* 2012. no. 3. pp. 148-152. (in Russian).
- 11 Yakovlev A.N. et al. Influence of multi-enzyme composition on the fermentation process of rye wort. Production of alcohol and alcoholic beverages. 2013. no. 3. pp. 26-28. (in Russian).
- 12 Tolgurova A.A., Khokonova M.B. Scientific and technological aspects of resource-saving technology in alcohol production. *Agricultural land use and food security.* 2018. pp. 170-174. (in Russian).
- 13 Zueva N.V. et al. Selection of enzyme preparations and temperature-time modes of water-heat and enzymatic treatment in the development of a comprehensive technology for processing grain raw materials. *Proceedings of VSUET.* 2019. vol. 81. no. 1 (79). (in Russian).
- 14 Polonsky V.I. et al. Evaluation of the content of antioxidants in barley and oats based on its physical parameters. *Bulletin of the Krasnoyarsk state agrarian University.* 2016. no. 8. (in Russian).
- 15 Jeon H. et al. Improvement of the Bioethanol Productivity from Debranned Barley. *Transactions of the Korean hydrogen and new energy society.* 2018. vol. 29. no. 6. pp. 648-653.

Сведения об авторах

Геннадий В. Агафонов д.т.н., кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gvagafonov@mail.ru


 <https://orcid.org/0000-0002-2133-5606>

Татьяна С. Ковалева ведущий инженер, кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tanyakova2501@gmail.com


 <https://orcid.org/0000-0002-3531-3811>

Information about authors


Gennadiy V. Agafonov Dr. Sci. (Engin.), fermentation and sugar production technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gvagafonov@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2133-5606>

Tatyana S. Kovaleva lead engineer, biochemical department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tanyakova2501@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-3531-3811>

Алексей Н. Яковлев к.т.н., кафедра технологии броидильных и сахаристых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vip.alex2702@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3246-6628>

Александр С. Муравьев к.т.н., отдел СМ, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hntrun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

Светлана Ф. Яковлева к.т.н., кафедра биохимии и биотехнологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, svetlana.yakovleva.68@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3686-9966>


Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат


Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Aleksey N. Yakovlev Cand. Sci. (Engin.), fermentation and sugar production technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vip.alex2702@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3246-6628>

Aleksandr S. Muravev Cand. Sci. (Engin.), SM department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hntrun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

Svetlana F. Yakovleva Cand. Sci. (Engin.), biochemical department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, svetlana.yakovleva.68@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3686-9966>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/08/2020	После редакции 20/08/2020	Принята в печать 31/08/2020
Received 10/08/2020	Accepted in revised 20/08/2020	Accepted 31/08/2020