

*Целью представленной работы являлось исследование процесса ферментации с максимальным уровнем накопления этилового спирта и низким содержанием растворимых несброженных углеводов. В процессе экспериментальных работ была исследована зерновая бражка, проведена оптимизация процесса брожения при производстве зерновых дистиллятов, сделан анализ физико-химических показателей зерновой бражки, полученной в оптимизированных условиях процесса брожения.*

*Проведение оптимизации процесса ферментации позволило подобрать дозировки ферментного препарата глюкоамилазы и начальной концентрации дрожжевых клеток для обеспечения максимального уровня накопления этилового спирта при сбраживании высококонцентрированного суслу при производстве зерновых дистиллятов.*

***Ключевые слова:** биосинтез этанола, сбраживание суслу, концентрация дрожжевых клеток, ферменты, видимая концентрация сухих веществ, накопление этанола.*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА БИОСИНТЕЗА ЭТАНОЛА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ**

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь

*Т. М. Тананайко, кандидат технических наук,  
доцент кафедры биотехнологии и биоэкологии*

РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси  
по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь

*А. А. Пушкарь, кандидат технических наук, начальник отдела технологий алкогольной  
и безалкогольной продукции ;*

*В. И. Соловей, научный сотрудник группы по спиртовой и ликеро-водочной отрасли  
отдела алкогольной и безалкогольной продукции*

Разработка ресурсосберегающих приемов ведения технологического процесса при получении зерновых дистиллятов на основе высококонцентрированного суслу является одним из способов совершенствования технологии производства зерновых дистиллятов, обеспечивающих снижение себестоимости конечного продукта. Уменьшение гидромодуля замеса эффективно, так как позволяет снизить удельный вес топливно-энергетических затрат в себестоимости продукции, поскольку на нагрев 1 кг зерна необходима лишь третья часть энергии, требуемой на нагрев 1 кг воды [1].

При получении высококонцентрированного суслу из крахмалсодержащего сырья возникают проблемы, связанные с повышением вязкости замесов. Уменьшить вязкость замеса, получить сусло с необходимыми реологическими свойствами возможно путем использования различных осаживающих средств, способствующих гидролизу высокомолекулярных веществ зернового сырья. В качестве таких средств используются амилитические ферменты зернового солода или культур микроорганизмов, преимущественно плесневых грибов и бактерий [2, 3].

Эффективность процесса сбраживания концентрированного суслу зависит от множества факторов: химического состава суслу, степени гидролиза биополимеров зернового сырья, в первую очередь крахмала, некрахмальных полисахаридов, белков [4, 5]; особенностей метаболизма используемых рас дрожжей; физиологического состояния дрожжевой биомассы; продолжительности сбраживания, температурных режимов ведения процесса и т.д. Для нормального развития дрожжей в процессе брожения нужно, чтобы в замесе содержались не только сбраживаемые сахара, но и достаточное количество усвояемых азотистых веществ.

Таким образом, проведение научных исследований по ферментативной обработке зернового сырья отечественного происхождения, учитывающих синергетическое взаимодействие энзимов зерна, солода и микробных экзоферментных препаратов при сбраживании суслу повышенных концентраций в технологии производства зерновых дистиллятов, является важным и актуальным.

Цель научно-исследовательской работы — оптимизация процесса сбраживания суслу повышенных концентраций при производстве зерновых дистиллятов, позволяющая ускорить процессы разбраживания суслу и повысить эффективность биосинтеза этанола.

Для оптимизации процесса ферментации с целью достижения максимального уровня накопления этилового спирта и глубокого изучения влияния концентрации сухих веществ, дозировки ферментного препарата глюкоамилазы и начальной концентрации дрожжевых клеток на эффективность протекания процесса сбраживания было выполнено планирование эксперимента, которое позволяет варьировать исследуемые факторы, определять вклад каждого фактора и получать количественные оценки эффектов их взаимодействия. Для этого использовали метод центрального композиционного ротатабельного планирования полного факторного эксперимента ПФЭ-2<sup>3</sup> со звездными точками.

В качестве основных факторов, влияющих на оптимизацию процесса брожения, были выбраны:

$X_1$  — видимая концентрация сухих веществ суслу, %;

$X_2$  — дозировка глюкоамилазы, используемой на стадии брожения, ед. ГлС /г условного крахмала;

$X_3$  — начальная концентрация дрожжевых клеток (в сбраживаемом сусле), млн кл./см<sup>3</sup>.

Пределы варьирования факторов были выбраны на основании ранее проведенных исследований и анализа литературных данных по переработке высококонцентрированного суслу в спиртовом производстве.

Условия проведения центрального композиционного ротатабельного планирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика факторов планирования эксперимента

Обозначение фактора	Уровень		«Звездные» точки		Центр эксперимента	Шаг варьирования
	нижний	верхний	нижняя	верхняя		
$X_1$ , %	17,00	21,00	15,63	22,36	19,0	2,0
$X_2$ , ед. ГлС /г	2,00	6,00	2,0	0,63	4,0	2,0
$X_3$ , млн. кл./см <sup>3</sup>	15,0	35,0	8,18	41,81	25,0	10,0

Критерием оценки глубины протекания процесса сбраживания высококонцентрированного суслу при изменении выбранных факторов являлись крепость зрелой бражки ( $Y$  %, об.) и содержание растворимых несброженных углеводов ( $Y_1$ , г/100 см<sup>3</sup>) по окончании процесса брожения.

В процессе брожения определяли крепость зрелой бражки согласно инструкции по технологическому контролю спиртового производства.

Эксперименты проводили в соответствии с матрицей планирования, приведенной в табл. 2.

Каждый опыт дублировали два раза. Среднее значение функций отклика  $Y$  и  $Y_1$  по результатам двух параллельных опытов использовали при математической обработке компьютерной системой планирования эксперимента STATGRAPHICS Plus for Windows.

**Условия проведения эксперимента.** Для эксперимента использовали образцы зернового суслу, полученного в лаборатории отдела технологий алкогольной и безалкогольной продукции РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». Соотношение зерна и воды составляло 1:2,5-2,8. Корректировку активной кислотности pH=5,0-5,2 осуществляли внесением серной кислоты. В качестве сырьевых компонентов использовано зерно тритикале (75 %) и ячменный солод (25 %).

В ходе эксперимента были использованы следующие технологические режимы:

- ♦ белковая пауза — 50–52 °С в течение 30 минут; мальтозная пауза — 60–62 °С в течение 30 минут; осахаривание — 70–72 °С — в течение 60–120 минут;

- ♦ для обеспечения гидролиза биополимеров зерна при подготовке высококонцентрированного сусла использовали ферментные препараты бактериальной термостабильной  $\alpha$ -амилазы Ликвафло (компании «Новозаймс АС», Дания) в количестве 0,2 ед. АС/г усл. Крахмала [6];
- ♦ при сбраживании для осахаривания декстринизированного сусла применяли препарат глюкоамилазы ГлюкоМакс (производство РУП «Мариз», Республика Беларусь).

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор			Функция отклика, Y, %, об.	Функция отклика, Y, г/100 см <sup>3</sup>
	X <sub>1</sub> , %	X <sub>2</sub> , ед. ГЛС /г	X <sub>3</sub> , млн. кл./см <sup>3</sup>		
1	17,0	6,0	15,0	8,2+ 0,1	0,62+ 0,02
2	19,0	4,0	8,2	8,9+ 0,2	0,6+ 0,03
3	19,0	0,6	25,0	8,4+ 0,1	0,7+ 0,02
4	21,0	2,0	35,0	10+ 0,3	0,72+ 0,01
5	21,0	2,0	15,0	9,6+ 0,1	0,77+ 0,01
6	17,0	2,0	15,0	7,9+ 0,1	0,5+ 0,02
7	21,0	6,0	35,0	10,4+ 0,2	0,47+ 0,01
8	19,0	4,0	25,0	9,5+ 0,1	0,6+ 0,01
9	15,6	4,0	25,0	7,6+ 0,3	0,68+ 0,02
10	21,0	6,0	15,0	10,2+ 0,1	0,66+ 0,02
11	19,0	4,0	41,8	9,6+ 0,2	0,76+ 0,01
12	22,4	4,0	25,0	10,7+ 0,2	0,6+ 0,02
13	19,0	7,4	25,0	9,6+ 0,3	0,62+ 0,01
14	17,0	6,0	35,0	8,4+ 0,2	0,73+ 0,03
15	19,0	4,0	25,0	9,5+ 0,1	0,52+ 0,02
16	17,0	2,0	35,0	8,1+ 0,3	0,53+ 0,01

Контроль качества декстринизированного сусла осуществлялся по йодной пробе. В полученное охлажденное до температуры 30-32 °С декстринизированное сусло вносили дрожжи Сафспирит Мальт (Safspirit Malt). Образцы помещали на брожение в емкости вместимостью 6,0 дм<sup>3</sup>, оборудованные гидрозатворами. Сбраживание проводили при температуре 29-31 °С в течение 72 часов. В процессе брожения проводили периодическое перемешивание образцов 4-5 раз в сутки.

По окончании процесса брожения в сброженном сусле контролировали объемную долю этилового спирта через 72 часа брожения и содержание растворимых несброженных углеводов.

**Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных.** В результате статистической обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость исследуемой функции отклика от выбранных факторов. Влияние каждого из варьируемых факторов графически отражали в виде стандартизированной карты Парето и графика главных эффектов отклика.

Стандартизированная карта Парето, изображенная на рис. 1 и 2, позволила установить значимые факторы. Пересечение стандартизированных эффектов вертикальной линией, которая представляет собой 95 %-ю доверительную вероятность, означает, что влияние факторов на функцию отклика статически значимо.

По степени значимости выбранные факторы распределились в следующем порядке. Наибольшее влияние на уровень накопления этанола в зрелой бражке оказывает видимая концентрация сухих веществ. Вторым по значимости фактором является дозировка фермента глюкоамилазы (с ее повышением крепость зрелой бражки увеличивается). В качестве третьего фактора в рассматриваемом интервале варьирования выступает начальная концентрация дрожжевых клеток, с увеличением которой повышается крепость зрелой бражки.

На уровень содержания растворимых несброженных углеводов наибольшее влияние оказывает видимая концентрация сухих веществ сусла, при повышении которой увеличивается и содержание растворимых несброженных углеводов. Вторым по значимости фактором является дозировка фермента глюкоамилазы (при ее увеличении содержание растворимых несброжен-

ных углеводов снижается). На третьем месте в рассматриваемом интервале параметров находится начальная концентрация дрожжевых клеток (с увеличением количества вносимой биомассы содержание растворимых несброженных углеводов уменьшается).

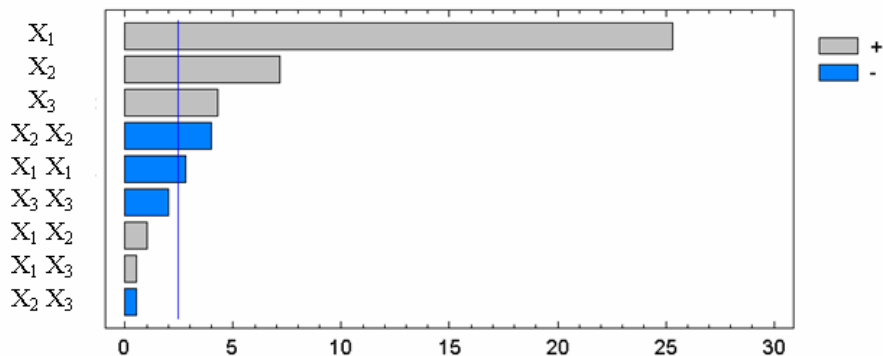


Рис. 1. Карта Парето для показателя крепости зрелой бражки

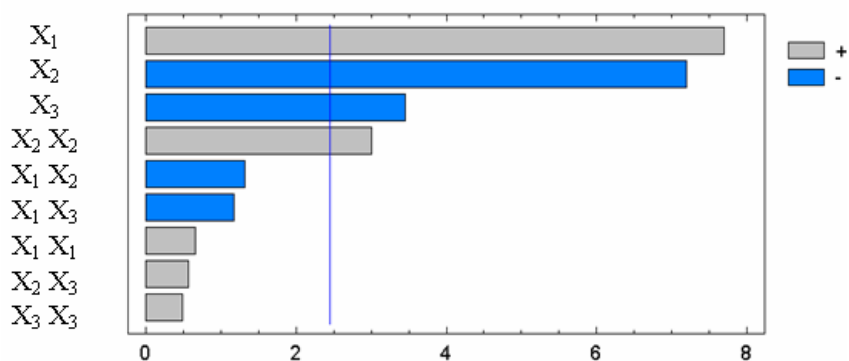


Рис. 2. Карта Парето для показателя содержания растворимых несброженных углеводов

Графики главных эффектов для показателей концентрации крепости зрелой бражки (рис. 3) и содержания растворимых несброженных углеводов (рис. 4) подтверждают вышеперечисленный порядок значимости факторов.

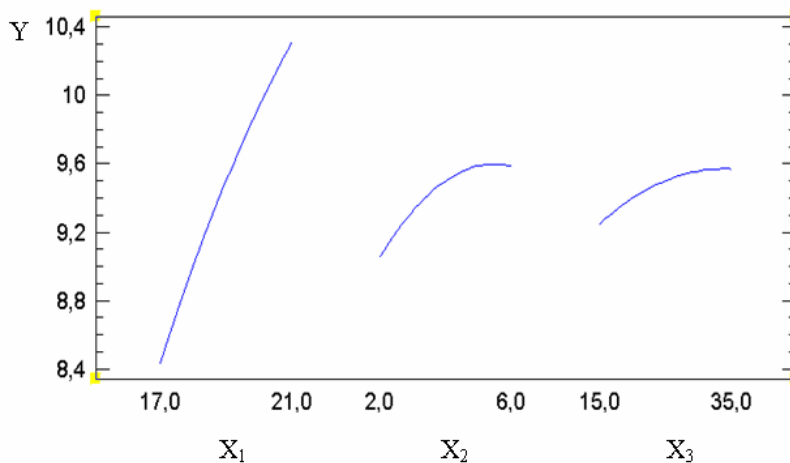


Рис. 3. Главные эффекты отклика для показателя крепости зрелой бражки

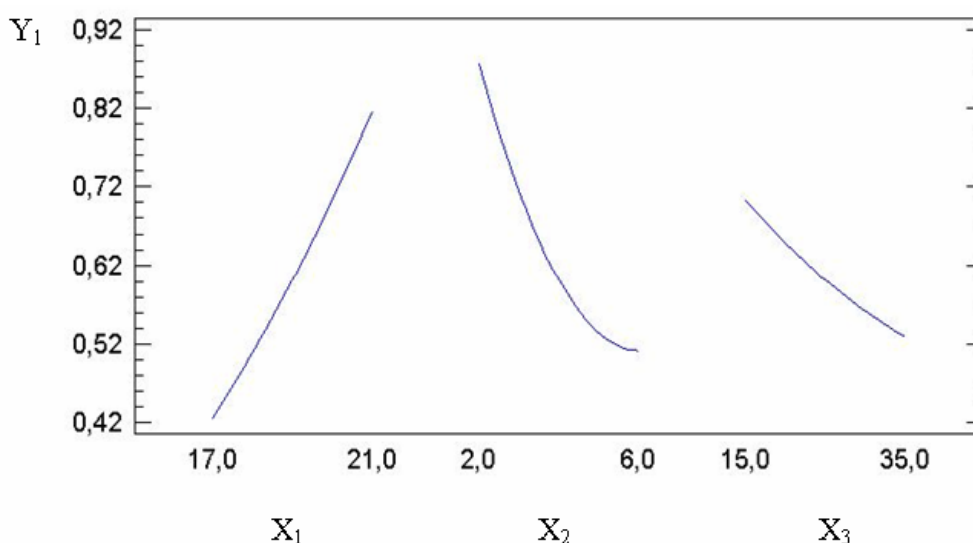


Рис. 4. Главные эффекты отклика для показателя содержания растворимых несброженных углеводов

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессий для показателя крепости зрелой бражки (1) и для показателя содержания растворимых несброженных углеводов (2):

$$Y = -11,609 + 1,58798 X_1 + 0,284937 X_2 + 0,0426787 X_3 - 0,0315816 X_1^2 + 0,0125 X_1 X_2 + 0,00125 X_1 X_3 - 0,0448401 X_2^2 - 0,00125 X_2 X_3 - 0,000909723 X_3^2. \quad (1)$$

$$Y_1 = -0,052547 - 0,00102495 X_1 - 0,0921768 X_2 + 0,0169174 X_3 + 0,00502495 X_1^2 - 0,0109375 X_1 X_2 - 0,0019375 X_1 X_3 + 0,0231446 X_2^2 + 0,0009375 X_2 X_3 + 0,000147966 X_3^2. \quad (2)$$

Работоспособность моделей подтверждается высокими коэффициентами детерминации  $R^2$ , равными 99,2 % для уравнения (1) и 95,8 % для уравнения (2) соответственно. Полученное значение коэффициента детерминации свидетельствует о высоком качестве уравнения модели.

Полученные уравнения регрессий позволяют не только предсказать значение функций отклика для заданных условий эксперимента, но и дают информацию о форме поверхности отклика. Исследование этих поверхностей необходимо для выбора оптимальных значений видимой концентрации сухих веществ сусле, дозировки глюкоамилазы, используемой на стадии брожения, и начальной концентрации дрожжевых клеток в сбраживаемом сусле при оптимизации процесса брожения.

Графическое влияние факторов на уровень накопления этилового спирта в зрелой бражке представлено в виде поверхности отклика на рис. 5.

Решающее значение при оптимизации процесса брожения имеет высокий уровень накопления этилового спирта в зрелой бражке: при низкой концентрации сухих веществ сусле он не будет достигнут, поэтому при постановке эксперимента особое внимание уделялось подготовке высококонцентрированного сусле.

Как видно из данных рис. 5, при концентрации сухих веществ 19 % и дозировке глюкоамилазы 4 ед. ГлС /г условного крахмала достигнут средний уровень накопления этилового спирта в бражке 9,25-9,50 %. С экономической точки зрения проведение технологического процесса при более низких значениях концентрации сухих веществ нецелесообразно. Для обеспечения достаточного накопления этилового спирта требуется повысить концентрацию сухих веществ сусле и увеличить дозировку ферментного препарата глюкоамилазы.

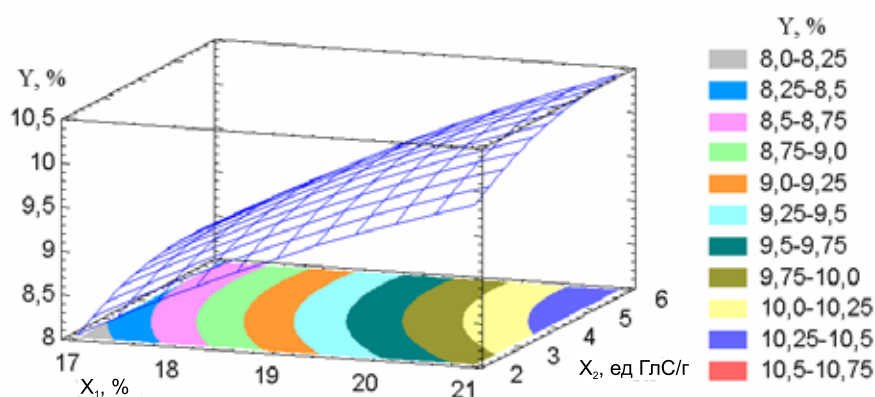


Рис. 5. График поверхностей отклика для показателя крепости зрелой бражки (при  $X_3 = 25,0$  млн. кл./см<sup>3</sup>)

Представленный на рис. 6 график поверхности отклика позволяет локализовать область значений факторов видимой концентрации сухих веществ и дозировки ферментного препарата глюкоамилазы, при которых накопление этилового спирта является максимальным.

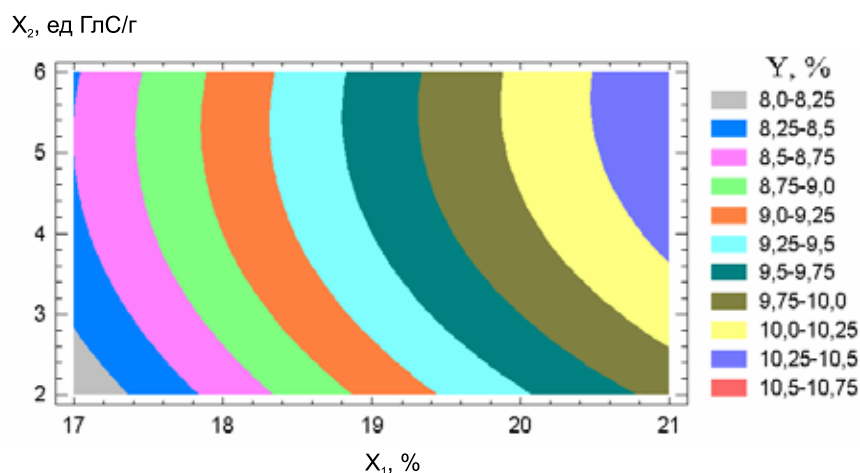


Рис. 6. Контурный график поверхностей отклика для показателя зрелой бражки при  $X_3 = 25,0$  млн. кл./см<sup>3</sup>

Данный интервал для видимой концентрации сухих веществ равен 19,0–21,0 %, при этом содержание этилового спирта в бражке достигает 9,50–10,50 %, а расход ферментного препарата глюкоамилазы находится в диапазоне 4,0–6,0 ед. ГлС /г условного крахмала, максимальные значения по крепости бражки могут быть достигнуты при концентрации перерабатываемого суслу 19,8–21,0 %.

С целью установления оптимальной начальной концентрации дрожжевых клеток в сбраживаемом сусле, была рассмотрена поверхность отклика (при  $X_1 = 19,0$  %), представленная на рис. 7.

Максимальный отклик показателя крепости зрелой бражки для значения видимой концентрации сухих веществ 19,0 % достигается при уровне начальной биомассы от 23,0 до 35,0 млн. кл./см<sup>3</sup>. Значение показателя накопления этилового спирта в данной области начальной концентрации дрожжевых клеток при дозировке ферментного препарата глюкоамилазы в диапазоне 4,0–6,0 ед. ГлС /г условного крахмала составляет 9,25–9,75 %.

Таким образом, для ресурсосберегающего ведения технологического процесса с максимальным уровнем накопления этанола в бражке, дозировка ферментного препарата глюкоамилаза должна находиться в пределах 4,0–6,0 ед. ГлС /г условного крахмала, начальная концентрация дрожжевых клеток — 23,0–35,0 млн. кл./см<sup>3</sup>.

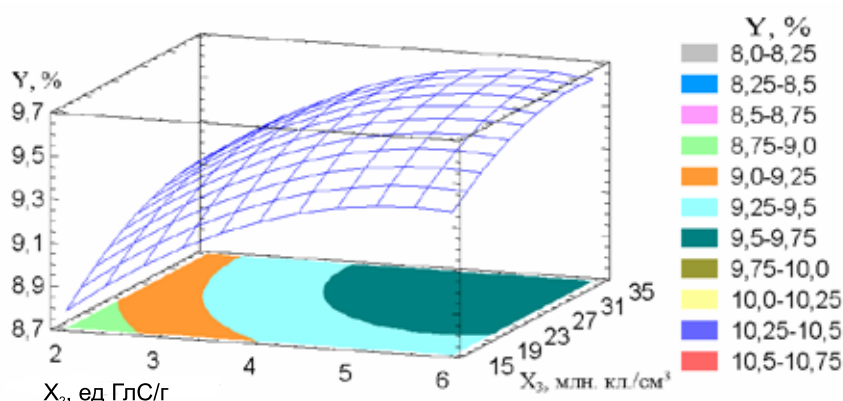


Рис. 7. График поверхностей отклика для показателя концентрации дрожжевых клеток (при  $X_1 = 19,0\%$ )

Опыт работы спиртовых предприятий показывает, что одним из важнейших в системе контроля спиртового производства является показатель содержания растворимых несброженных углеводов после окончания процесса брожения, который характеризует глубину протекания ферментативных процессов. Допустимой считается массовая концентрация растворимых несброженных углеводов в бражке в пределах  $0,50\text{--}0,65\text{ г}/100\text{ см}^3$ .

Эти данные являлись ориентиром при более детальном рассмотрении графических зависимостей функции отклика от варьируемых факторов для уточнения дозировки ферментного препарата глюкоамилазы и начальную концентрацию дрожжевых клеток при концентрации сухих веществ выше  $19,8\%$ . Были изучены поверхности отклика и контурные графики поверхности отклика в разрезе изменения содержания растворимых несброженных углеводов от  $0,53$  до  $0,69\text{ г}/100\text{ см}^3$  (рис. 8 и 9).

На основании анализа графических зависимостей установлены области значения факторов, где наблюдаются наилучшие результаты по содержанию растворимых несброженных углеводов при изменении начальной концентрации дрожжевых клеток и количества внесенной глюкоамилазы.

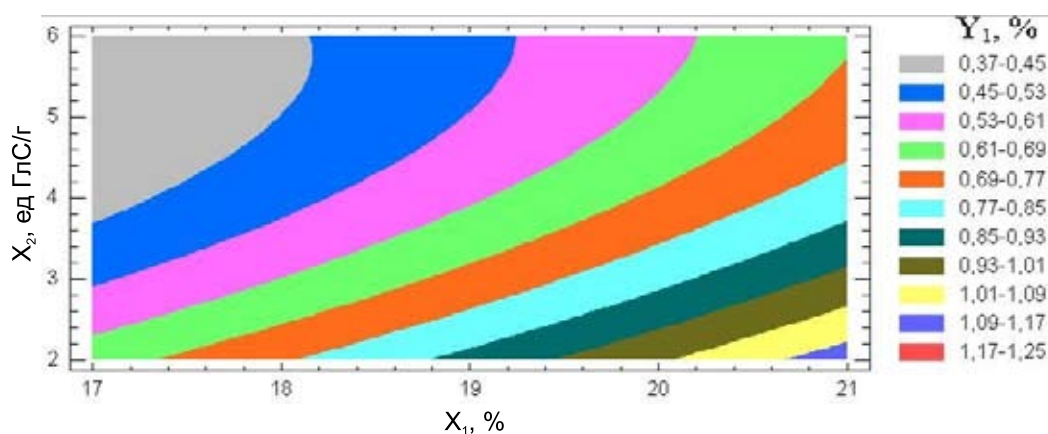


Рис. 8. Контурный график поверхностей отклика для показателя содержания растворимых несброженных углеводов при начальной концентрации клеток  $X_3 = 25,0\text{ млн. кл./см}^3$

При видимой концентрации сухих веществ  $19,8\text{--}21,0\%$  (рис. 8 и 9) минимальное содержание растворимых несброженных углеводов колеблется в диапазоне  $0,53\text{--}0,69\text{ г}/100\text{ см}^3$  при начальной концентрации дрожжевых клеток  $30,0\text{--}35,0\text{ млн. кл./см}^3$ , а оптимальный расход ферментного препарата с глюкоамилазной активностью находится в интервале  $5,0\text{--}6,0\text{ ед. ГлС/г}$  условного крахмала. Учитывая, что ферментный препарат с глюкоамилазной активностью определяет окончательную глубину гидролиза предельных декстринов и остаточного крахмала в процессе

спиртового брожения, рациональный расход ферментного препарата глюкоамилазы составит не более 5,0 ед. ГлС/г условного крахмала. Дальнейшее увеличение дозировки ферментного препарата глюкоамилазы экономически нецелесообразно.

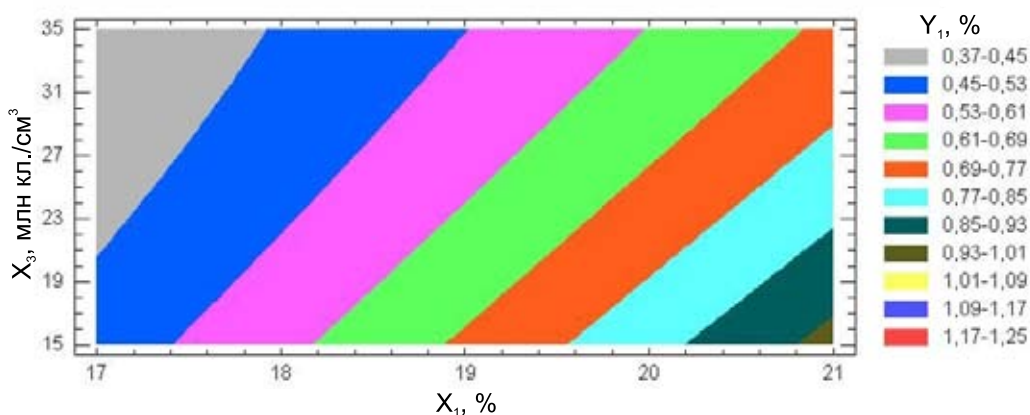


Рис. 9. Контурный график поверхностей отклика для показателя содержания растворимых несброженных углеводов при  $X_2 = 4,0$  ед. ГлС /г условного

Изучение графических зависимостей позволяет утверждать, что для сбраживания высококонцентрированного суслу с обеспечением наибольшего уровня накопления этилового спирта в зрелой бражке в диапазоне концентраций 15,6-22,4 %, оптимальной является видимая концентрация сухих веществ 19,8-21,0 %. Эффективная переработка суслу такой концентрации с накоплением спирта в бражке 10,0-10,5 % об. достигнута при начальной концентрации дрожжевых клеток в сбраживаемом сусле 30,0-35,0 млн кл./см<sup>3</sup>, дозировке ферментного препарата глюкоамилазы в количестве не более 5,0 ед. ГлС/г условного крахмала, при этом содержание растворимых несброженных углеводов составляет 0,53-0,69 г/100 см<sup>3</sup>.

Обобщая полученные экспериментальные результаты, можно сделать вывод о том, что при проведении процесса сбраживания суслу с видимой концентрацией сухих веществ 19,0-21,0 % концентрация посевного материала дрожжевых клеток должна быть не менее 30,0 млн кл./см<sup>3</sup>, при этом норма расхода ферментного препарата глюкоамилазы — не более 5,0 ед. ГлС/г условного крахмала. Применение данных технологических параметров обеспечит накопление спирта в зрелой бражке до 10,0 – 10,5 % об. при уровне несброженных углеводов не более 0,7 г/100 см<sup>3</sup>, что позволит заложить основу ресурсосберегающего ведении технологического процесса при совершенствовании технологии изготовления зерновых дистиллятов.

При переработке суслу с видимой концентрацией сухих веществ свыше 21,0 %, учитывая особенности изменения функций отклика от исследуемых параметров оптимизации, целесообразно рекомендовать увеличение расхода ферментного препарата глюкоамилазы и повышение начальной концентрации дрожжевых клеток.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинированная технология глубокой переработки зернового сырья в спиртовом производстве / М. В. Амелякина [и др.] // Ликероводочное производство и виноделие. — 2013. — № 3–4. — С. 13–17.
2. Исследование реологических характеристик замесов для оценки действия ферментных препаратов с термостабильной  $\alpha$ -амилазой / Е. М. Максимова [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. — 2001. — № 1. — С. 22–25.
3. Максимова, Е. М. Механические и биотехнологические способы выделения фракций некрахмальных полисахаридов зерна, перерабатываемого в этанол / Е. М. Максимова, Л. Н. Крикунова, Е. М. Мельников // Известия вузов. Пищевая технология. — 2001. — № 1. — С. 34–36.



4. Сравнительная характеристика способов получения суслу для производства зерновых дистиллятов / Л. А. Оганесянц [и др.] // Пиво и напитки. — 2014. — №3. — С. 44–47.
5. *Оганесянц, Л. А.* Влияние вида сырья на процесс сбраживания суслу для производства зерновых дистиллятов / Л. А. Оганесянц, Л. Н. Крикунова, В. А. Песчанская // Пиво и напитки. — 2014. — №4. — С. 22–25.

*Рукопись статьи поступила в редакцию 08.11.2017*

**T. M. Tananaiko, A. A. Pushkar, V. I. Solovei**

## **OPTIMIZATION OF ETHANOL BIOSYNTHESIS IN THE TECHNOLOGY OF OBTAINING GRAIN DISTILLATES**

The purpose of this work was to study the process of fermentation with a maximum level of accumulation of ethyl alcohol and a low content of soluble unfermented carbohydrates.

In the course of the experimental work, the grain mash was investigated, optimization of the fermentation process was carried out during the production of grain distillates, an analysis was made of the physicochemical parameters of the grain mash produced in the optimized conditions of the fermentation process.

Conducting optimization of the fermentation process allowed to select the dosages of the enzyme preparation glucoamylase and the initial concentration of yeast cells to ensure the maximum level of accumulation of ethyl alcohol during fermentation of highly concentrated wort during the production of grain distillates.

Keywords: ethanol biosynthesis, wort fermentation, concentration of yeast cells, enzymes, apparent concentration of solids, accumulation of ethanol.

УДК 664.38

*В статье приведены сведения о составе, пищевой ценности протеиновых батончиков, технологиях их производства. Проведен анализ рынка и разработана классификация протеиновых батончиков.*

*Ключевые слова: протеиновые батончики, пищевая ценность, белки, жиры, углеводы, пищевые добавки, классификация, сырье, технология производства.*

## **ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРОИЗВОДСТВА И РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ ПРОТЕИНОВЫХ БАТОНЧИКОВ**

**РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь**

*С. Е. Томашевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела технологий кондитерской и масложировой продукции*

**УО «Белорусский государственный экономический университет», г. Минск, Республика Беларусь**

*А. Н. Лилишенцева, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения продовольственных товаров;*

*Ю. А. Медведева, специалист по товароведению и экспертизе пищевых продуктов кафедры товароведения продовольственных товаров*

Здоровый образ жизни, в том числе поддержание физической формы и соблюдение принципов здорового питания, приобретает все большую популярность в современном обществе. Пос-