

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2561>
<https://elibrary.ru/JTTSM>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Управление технологическими процессами ресурсосбережения свеклосахарного производства с использованием метода статистического моделирования



С. К. Мизанбекова^{1,*}, И. П. Богомолова²,
И. Н. Василенко², Н. М. Шатохина²

¹ Казахский национальный аграрный исследовательский университет^{ROR}, Алматы, Республика Казахстан

² Воронежский государственный университет инженерных технологий^{ROR}, Воронеж, Россия

Поступила в редакцию: 15.03.2024

Принята после рецензирования: 27.05.2024

Принята к публикации: 04.06.2024

*С. К. Мизанбекова: salima-49@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-7602-9710>

И. П. Богомолова: <https://orcid.org/0000-0001-5883-1294>

И. Н. Василенко: <https://orcid.org/0000-0002-2899-5455>

© С. К. Мизанбекова, И. П. Богомолова, И. Н. Василенко,
Н. М. Шатохина, 2025



Аннотация.

Использование информационных технологий и методов статистического моделирования в управлении технологическими процессами свеклосахарного производства приобретает все большее значение в условиях цифровизации экономики. Их применение позволяет провести комплексный анализ всех отраслевых процессов, выявить проблемные области и риски, реализовать технико-технологические мероприятия с упором на социально-экономическое направление. Цель работы – повысить технологическую эффективность процессов ресурсосбережения с использованием экономико-математических методов.

Объектом исследования послужило свеклосахарное производство РФ. Прикладные разработки апробированы на примере предприятия Центрального федерального округа РФ. В ходе исследования использовались методы статистической группы (наблюдение, анализ, абсолютные и относительные величины, сводка и группировка), а также аналогия, синтез, описание, обобщение, научное объяснение, формализация, экспертная оценка, историческая ретроспектива, моделирование, экономико-статистическое моделирование.

В работе составлена линейная модель множественной регрессии и расчетная модель оценки уровня технологической эффективности сахарного производства. Проведенные расчеты и практика отраслевой деятельности показывают, что совершенствование техники и технологии может обеспечить уменьшение расхода топлива без реализации высокотратных проектов в сфере энергосбережения, повысить эффективность переработки свеклы (+32 %), сократить ресурсоемкость производственного процесса, а именно снизить расход известнякового камня (~23 %), топлива (~18 %) и вспомогательных материалов (~14 %).

Предложена расчетная модель, которую целесообразно использовать на тактическом уровне отраслевого управления для оценки эффективности работы заводских смен. Модель позволит проводить сравнительный анализ показателей в реальном времени, а не в конце декады, и оперативно выявлять угрозы нарушения технологического процесса.

Ключевые слова. Свеклосахарное производство, математическое моделирование, информатизация и совершенствование технологических процессов, эффективное производство, ресурсосбережение

Для цитирования: Мизанбекова С. К., Богомолова И. П., Василенко И. Н., Шатохина Н. М. Управление технологическими процессами ресурсосбережения свеклосахарного производства с использованием метода статистического моделирования. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 1. С. 122–135. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2561>

Technological Management of Resource Saving in Sugar Beet Production Using Statistical Modeling



Salima K. Mizanbekova^{1,*}, Irina P. Bogomolova²,
Irina N. Vasilenko², Natalya M. Shatohina²

¹ Kazakh National Agrarian Research University^{ROR}, Almaty, Kazakhstan

² Voronezh State University of Engineering Technologies^{ROR}, Voronezh, Russia

Received: 15.03.2024
Revised: 27.05.2024
Accepted: 04.06.2024

*Salima K. Mizanbekova: salima-49@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-7602-9710>
Irina P. Bogomolova: <https://orcid.org/0000-0001-5883-1294>
Irina N. Vasilenko: <https://orcid.org/0000-0002-2899-5455>

© S.K. Mizanbekova, I.P. Bogomolova, I.N. Vasilenko,
N.M. Shatohina, 2025



Abstract.

Information technologies and statistical modeling have become an inherent part of technological management in sugar beet production. They provide a comprehensive analysis of all industry processes, as well as make it possible to implement technological socio-economic measures and identify problem areas and risks. The article describes the technological efficiency of resource-saving processes based on economic and mathematical methods.

The study focused on the domestic sugar beet production; the R&D was tested at an enterprise in the Central Federal District of the Russian Federation. It involved standard research methods, as well as expert assessment, historical retrospective, and economic and statistical modeling.

The linear multiple regression model and the technological efficiency calculation model supported the empirical results. Better equipment and technology reduce fuel consumption without implementing high-cost energy saving projects and increase the efficiency of beet processing (+32%). In addition, they reduce the resource intensity of limestone (~23%), fuel (~18%), and auxiliary materials (~14%).

The calculation model can be used to strategize the industry management and assess the efficiency of factory shifts. The model promptly identifies threats of technological disruption and allows for a real time comparative analysis.

Keywords. Sugar beet production, mathematical modeling, informatization and improvement of technological processes, efficient production, resource conservation

For citation: Mizanbekova SK, Bogomolova IP, Vasilenko IN, Shatohina NM. Technological Management of Resource Saving in Sugar Beet Production Using Statistical Modeling. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(1):122–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-1-2561>

Введение

Свеклосахарная промышленность относится к важнейшим структурно-функциональным звеньям российского агропромышленного комплекса, призванным решать социальные проблемы обеспечения продовольственной безопасности населения страны. Сегодня в России насчитывается порядка 66 действующих сахарных заводов (на начало 2024 г. в активной фазе функционирования находилось 40 отраслевых предприятий). Данные предприятия имеют ряд отличительных признаков, в частности, по уровню номинальных производственных мощностей, которые могут варьироваться от нескольких тонн до более чем 200 тыс. т. Кроме того, суточное производство сахара

в начале 2024 г. составило 19 тыс. т, что превышает норму суточного потребления сахара на 7,4 тыс. т. Все это доказывает положительный производственно-потребительский баланс.

На фоне постоянного роста стоимости всех видов ресурсов для устойчивого развития свеклосахарного подкомплекса необходимо повышение технологической эффективности и уровня ресурсосбережения, а также сокращение потерь и себестоимости. Одним из актуальных направлений модернизации работы предприятия является использование математических подходов в управлении производственно-технологическими процессами. Это позволяет не только снизить издержки, повысить уровень контроля и качества

планирования, но и обеспечить рост отраслевого производства в области информатизации технологических процессов ресурсосбережения. Явный научный интерес к данным сферам исследования прослеживается в работах [1–9].

Несмотря на многие ограничения в сфере отечественного свеклосахарного производства, в том числе связанные с действием экономических санкций, в 2023 г. уровень самообеспечения сахаром в России составил 114,2 %, что на 24,2 п. п. выше порогового значения Доктрины (Указ Президента РФ № 20 от 21.01.2020). При этом в 2024 г., по данным Минсельхоза РФ, показатель самообеспечения сахаром снизился до 107 %, однако это выше нормативного значения на 17 п. п. Валовый сбор сахарной свеклы в РФ снизился по сравнению с 2013 г. на 13,4 % и в натуральном выражении составил 44 млн т, при этом рекордный показатель был отмечен в 2019 г., когда было собрано 54,4 млн т данного корнеплода. В 2024 г. отмечено снижение урожайности свеклы на 22 % при росте посевных площадей на 9,9 % (до 1169 тыс. га), также была зафиксирована более высокая дигестия (сахаристость) свеклы (+6,5 % к 2023 г.) и выход сахара (+5,24 % к 2023 г.). Производство свекловичного сахара в сезоне 2024/25 будет продолжаться до августа 2025 г. и, согласно прогнозным данным, а также с учетом выработки из мелассы и сиропа, составит более 6,1 млн т (–11,2 % к предыдущему сезону). Ожидается, что рынок сахара в 2024/25 гг. будет устойчив и сбалансирован за счет накопленных в предыдущие годы существенных запасов сахара, также вполне возможен высокий экспорт – более одного млн т (рекорд 2019/20 – 1,5 млн т). По данным Росстата, запасы сахара только на сахарных заводах на конец октября 2024 г. составили 1973 тыс. т (в 2023 г. – 1734 тыс. т, в 2015 г. – 1281 тыс. т).

В 2024 г. отрасль отработала на хорошем уровне. В частности, не был пущен лишь один из 67 действующих сахзаводов, а два завода Курской области пустились с некоторой задержкой. Так, суточная выработка сахара в России в начале октября 2024 г. выходила на исторический пик ~54,5 тыс. т. При этом затраты свекловодов продолжают возрастать.

Потребление сахара в РФ в период 2023/24 медленно снижалось и в 2024/25 гг. составит не более 5,75 млн т, и его заметный рост в ближайшие годы маловероятен. Однако рынок сахара России по-прежнему остается конкурентным, в частности, на текущий момент действуют 28 независимых производителей сахара, сотни независимых производителей сахарной свеклы (и зачетчиков), получающих сахар по давальческим схемам и взаиморасчетам, десятки крупнооптовых трейдеров, Белорусская сахарная компания, ОЗК и Росрезерв.

Основными рисками для производства свеклы в 2025 г. может стать своевременное обеспечение семенами эффективных гибридов и средствами защиты растений, которые в большинстве своем остаются импортными. Это формирует дополнительную неопре-

деленность к непростой в последние годы ситуации с логистикой, взаиморасчетами и поставками многих средств производства с импортными компонентами. Если поставка всех необходимых средств производства для свеклосахарной отрасли будет успешна, то Россия (вместе с Беларусью) в ближайшие годы может войти в группу крупнейших мировых экспортеров сахара (включая и свекловичный сахар-сырец) и поставлять стабильно не менее одного млн т в год на многие рынки Евразии и Африки [10].

Цель работы – повысить технологическую эффективность процессов ресурсосбережения с использованием экономико-математических методов. Задачи: составить линейную модель множественной регрессии, определяющую перечень параметров, необходимых для расчета выхода сахара; предложить расчетную модель оценки уровня технологической эффективности сахарного производства; провести научное обоснование влияния отдельных параметров на эффективность технологического процесса производства сахара.

Объекты и методы исследования

Работа выполнена на базе Казахского национального аграрного университета (г. Алматы, Республика Казахстан) и Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия).

В качестве объекта исследования выступило отечественное свеклосахарное производство; прикладные разработки были апробированы на примере одного из заводов ЦФО РФ. В ходе исследования использовались методы статистической группы (наблюдение, анализ, абсолютные и относительные величины, сводка и группировка), а также аналогия, синтез, описание, обобщение, научное объяснение, формализация, экспертная оценка, историческая ретроспектива, моделирование, экономико-статистическое моделирование. Особое значение имели корреляционно-регрессионный анализ, критерии Акаике (AIC) и Шварца (BIC), метод наименьших квадратов (МНК), методические положения отраслевой учетно-контрольной документации, отраслевые технологические карты, методические основы технологии производства сахара на отечественных предприятиях. В работе были использованы официальные данные государственной статистики (Росстат); научные публикации в рецензируемых журналах за период 2019–2023 гг. из наукометрических баз данных (Scopus, Web of Science, eLIBRARY.RU); нормативно-правовые документы профильных министерств и ведомств (Минсельхоз России); информация из СПС Гарант; данные, содержащиеся в годовых отчетах Союза сахаропроизводителей России (декадные сведения за 2023/24 гг.).

Результаты и их обсуждение

Сделанные выводы фактически подтверждаются деятельностью отраслевых предприятий. Несмотря на негативные последствия введения экономических

санкций, предприятия не остановили свою работу. Ограничения, затронувшие экспорт гранулированного жома железнодорожным транспортом, привели к переориентации рынков сбыта на страны Востока и Азии. Вместе с тем предприятие (объект данного исследования) адаптировалось к изменениям в цепочках поставок: основными поставщиками импортных запасных частей, масел, химических ингредиентов и других вспомогательных материалов стали компании из Китая. В связи с этим предприятие сосредоточилось на ряде ключевых задач, включая оптимизацию производственных процессов, повышение эффективности работы сотрудников и отдельных участков, сокращение затрат на производство и сбыт, а также внедрение мероприятий по ресурсо- и энергосбережению. Последовательное выполнение этих задач обеспечило выпуск конкурентоспособной продукции, способствовало выходу на экспортные рынки, заключению долгосрочных контрактов с крупными промышленными партнерами и получению стабильной прибыли. Так, было установлено, что валовой сбор сахарной свеклы снизился по сравнению с предыдущим годом на 13,4 % и составил 44 млн т. Урожайность культуры снизилась на 22 %, при этом посевные площади увеличились на 9,9 % – до более 1,16 млн га. Согласно прогнозам, рынок сахара в сезоне 2024/25 будет сбалансирован и устойчив за счет накопленных в предыдущие годы существенных запасов. Производство свекловичного сахара в сезоне 2024/25 с учетом выработки из мелассы и сиропа, по оценкам экспертов, превысит 6,1 млн т, что на 11,2 % ниже предыдущего сезона. Запасы сахара на сахарных заводах на конец октября 2024 г. составили 1973 тыс. т. Экспорт сахара из России с осени 2024 г. активизировался и в ноябре достиг 114 тыс. т. Основной объем поставок из России в последние годы осуществляется по железной дороге на рынки таких стран, как Казахстан, Узбекистан, Таджикистан, Азербайджан, Киргизия, Туркмения, Монголия, и др. Цены на сахар на внутреннем рынке после длительного снижения стали расти с начала сентября 2024 г. При этом затраты свекловодов продолжают увеличиваться. Отраслевые специалисты подчеркивают, что в хозяйствах, соблюдающих все аспекты агротехнологии, с учетом амортизации и доставки свеклы-2025 затраты могут превысить 180–200 тыс. руб. без НДС на один га. Теоретически можно вкладывать меньше, экономив на эффективных семенах, СЗР, удобрениях, ГСМ и прочем, но это гарантированно обернется существенным снижением отдачи сахара с одного га и резким ростом погодных и других рисков [10, 11].

Проведенное исследование показало, что в анализируемый период менеджмент предприятия эффективно реализовывал технико-технологическую политику в области ресурсосбережения. Предприятие продолжило курс на модернизацию производства с целью постепенного роста производительности труда работников и улучшения технологических показателей

переработки сахарной свеклы. Внедрение в производство разработанных рекомендаций, направленных на повышение уровня информатизации технологических процессов, будет способствовать сохранению стратегической ориентации предприятия на развитие инноваций, расширение рынков сбыта за счет повышения качества продукции и снижения потерь сахара в производстве.

В настоящее время большой практический интерес для отраслевых специалистов представляет изучение производственно-технологических и экономических процессов с позиции «фактор-результат» на основе применения экономико-математических подходов [12, 13]. Экономико-статистические методы, например, корреляционно-регрессионный анализ [14], играют важную роль в исследовании технологических процессов. Современные подходы все чаще предполагают применение математических методов, одним из центральных элементов которых является уравнение регрессии, описывающее процесс производства сахара с определенной степенью формализации и достоверности. Данная модель дает возможность определить уровень и степень взаимосвязи между результирующим показателем (выход сахара) и воздействующим компонентом (фактором производства) [15, 16].

Исследование отраслевой отчетной документации позволило сделать вывод, что основным показателем технологической эффективности производства сахара является его выход (Y). К основным технологическим параметрам следует отнести: X_1 – массу выработки свеклы в сутки (среднесуточная производительность), т; X_2 – уровень достижения нормы суточной производительности, %; X_3 – сахаристость корнеплодов при приемке, т. е. содержание сахарозы в сахарной свекле (дигестия), оценивается в процентах от массы исходного сырья (свеклы), %; X_4 – сахаристость корнеплодов при сдаче, %; X_5 – содержание сахара в свекловичной стружке, %; X_6 – потери сырья на поле, при транспортировке и хранении, % от исходной массы свеклы; X_7 – потери сахара в производственном процессе (факт), % от массы выработанного сахара; X_8 – процентное содержание сахара в мелассе (факт), %; X_9 – расход условного топлива (факт), %; X_{10} – расход известкового камня (факт), %.

Отмеченные параметры являются воздействующими факторами на результирующий показатель (выход сахара). С целью установления уровня и степени зависимости между отмеченными выше параметрами были использованы данные замеров (73 ед.), проведенных на различных сахарных заводах. Последние были сведены в единый массив и представлены в виде матрицы (73×10). Таким образом, была сформирована регрессионная модель на основе данных корреляционного анализа [17–19].

Теснота взаимосвязи между воздействующими факторами (X) и результирующим показателем (Y)

была оценена с помощью выборочного линейного коэффициента парной корреляции Пирсона по формуле:

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})(Y_i - Y_{cp})}{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2} \quad (1)$$

где X_i и Y_i – фактические данные величин, представленные в заводских производственно-технологических отчетах; X_{cp} и Y_{cp} – выборочные средние данные исследуемых величин:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, Y_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

В таблице 1 приведена матрица коэффициентов корреляции технологических показателей свеклосахарного производства в России [4].

Учитывая то, что процесс производства сахара очень сложен технологически и на конечный результат (выход сахара) могут оказывать влияние случайные величины, необходимо выполнить проверку полученных величин на статистическую значимость. Как итог, вероятность того, что результаты были получены в ходе случайных событий (флуктуаций), составляет всего 5 %. С экономической точки зрения все воздействующие факторы можно сгруппировать:

– Первая группа включает показатели среднесуточной производительности (X_1), т; уровень достижения нормы суточной производительности (X_2), % от плановой. Коэффициенты корреляции этих величин с выходом готовой продукции (Y), составили $r_{yx_1} = -0,08$; $r_{yx_2} = 0,33$.

– Вторая группа включает показатели сахаристости свеклы – дигестия свеклы при приемке (X_3), %; дигестия свеклы при сдаче (X_4), %; сахаристость свекловичной стружки (X_5), %. Коэффициенты корреляции этих величин с выходом готовой продукции (Y) составили соответственно $r_{yx_3} = 0,79$; $r_{yx_4} = 0,81$; $r_{yx_5} = 0,85$. Все

данные производственные показатели демонстрируют сильную взаимосвязь с результирующей переменной (Y).

– Третья группа включает показатели потерь при производстве сахара – потери при хранении и транспортировке (X_6), %; фактические потери сахара в производстве (X_7), %; фактическое содержание сахара в мелассе (X_8), %. Коэффициенты корреляции этих величин с выходом готовой продукции (Y) составили $r_{yx_6} = -0,52$; $r_{yx_7} = -0,44$; $r_{yx_8} = -0,50$.

– Четвертая группа объединяет показатели расхода топлива и вспомогательных материалов, фактический расход условного топлива (X_9), %; фактический расход известкового камня (X_{10}), %. Коэффициенты корреляции перечисленных величин с выходом готовой продукции (Y) составили $r_{yx_9} = -0,11$; $r_{yx_{10}} = -0,18$.

На основе полученных данных были составлены линейные модели множественной регрессии. Проведен расчет детерминации и t -статистики для выяснения значимости соответствующих коэффициентов. Отбор наиболее действенных моделей проводился по методологии Акаике (AIC) и Шварца (BIC) [20–23]. Установлено, что наибольшее влияние на результирующий показатель (выход сахара (Y)) оказывают следующие параметры: среднесуточная производительность (X_1), т; содержание сахара в свекловичной стружке (X_5), %; потери сахара в рамках производственного процесса (факт) (X_7), %; расход условного топлива (факт) (X_9), %. Применен метод наименьших квадратов (МНК) с целью определения значений коэффициентов модели (табл. 2) [4].

Таким образом, модель регрессии приняла следующий вид:

$$Y = -7,02 \times 10^{-5} X_1 + 0,95 X_5 - 1,15 X_7 - 0,11 X_9 + \varepsilon \quad (2)$$

Расчетные данные параметров таковы: $R^2 = 0,93$ ед. (детерминация); 7,23 ед. (оценочный критерий Акаике

Таблица 1. Матрица коэффициентов корреляции технологических показателей свеклосахарного производства в РФ [4]

Table 1. Correlation coefficients of technological indicators in Russian sugar beet production [4]

	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
Y	1										
X_1	-0,08	1									
X_2	0,33	0,16	1								
X_3	0,79	0,07	0,20	1							
X_4	0,81	0,07	0,22	0,99	1						
X_5	0,85	0,04	0,23	0,98	0,99	1					
X_6	-0,52	0,18	-0,19	-0,14	-0,18	-0,31	1				
X_7	-0,44	0,08	-0,25	0,14	0,11	0,06	0,40	1			
X_8	-0,50	0,35	-0,18	-0,09	-0,12	-0,17	0,46	0,35	1		
X_9	-0,11	-0,68	-0,18	-0,17	-0,17	-0,14	-0,13	0,04	-0,13	1	
X_{10}	-0,18	-0,40	0,03	-0,29	-0,29	-0,27	-0,02	-0,10	-0,01	0,65	1

Таблица 2. Коэффициенты регрессионной модели производства сахара [4]

Table 2. Regression model coefficients in sugar production [4]

Фактор производства сахара	Коэффициент модели	Стандартная ошибка коэффициента	t-статистика	p-значение для оценки значимости фактора производства
Среднесуточная производительность, X_1 , т	-7,02E-05	1,21E-05	-5,758	< 0,0001
Сахаристость свекловичной стружки, X_5 , %	0,953368	0,0118075	80,740	< 0,0001
Потери сахара в производстве (факт), X_7 , %	-1,15373	0,0515600	-22,380	< 0,0001
Расход условного топлива (факт), X_9 , %	-0,106975	0,0376212	-2,843	0,0059

(AIC)); 1,93 ед. (оценочный критерий Шварца (BIC)). Отмеченные критерии имеют минимальные значения из всех полученных. Расчет p -значения подтвердил значимость детерминации коэффициентов (факторов производства сахара), т. к. значение последнего составило 0,01 (1 %). Можно сделать вывод, что все отмеченные факторы имеют существенное влияние на результирующий показатель модели, т. е. на уровень выхода сахара в ходе технологического процесса.

В настоящее время экономическая оценка ресурсосберегающей и хозяйственной деятельности отечественных сахарных заводов основывается на использовании данных финансовой отчетности, соответствующих международным стандартам. Основные результаты определяются эффективностью организации производственно-технологических процессов [24–27]. Для повышения достоверности и объективности оценки необходимо дополнить перечень технологических параметров экономическими, в том числе технологической себестоимостью (СБ_т).

К основным показателям оценки отраслевой эффективности стоит отнести: выход сахара (B_{cx}); потери сахара и свеклы (Π); коэффициент завода / коэффициент производства или использования сырья (K); фактический расход извести ($P_{и}$); фактический расход условного топлива ($P_{усл}$).

Среди ограничений данных показателей выделим недостаток их информативности. В реальных производственных процессах они взаимосвязаны и воздействуют друг на друга: выход сахара существенно зависит от дигестии, потерь и расхода топлива; полнота извлечения сахара находится в прямо пропорциональной зависимости от расхода топлива и энергии.

Если рассматривать технологический процесс производства сахара с чисто экономической точки зрения, то важнейшим показателем эффективности будет удельная прибыль (УП), которая представляет собой разность между отпускной ценой (Π_0) и полной себестоимостью (СБ). Себестоимость единицы продукции можно определить как аккумулярованную сумму затрат, соотношенную с общим количеством выработанного готового продукта (сахара):

$$СБ = \frac{M_{cb} \times \Pi_{cb} + M_t \times \Pi_t + M_{bm} \times \Pi_{bm} + 3_{п}}{M_{cx}} \quad (3)$$

где M_{cx} – объем выработки сахара, т; M_{cb} , M_t , M_{bm} – расход свеклы, топлива и вспомогательных материалов, т; $3_{п}$ – величина заработной платы персонала; Π_{cb} – отпускная цена потребленной свеклы, руб./т; Π_t – отпускная цена потребленного газа, руб./м³; Π_{bm} – отпускная цена потребленных вспомогательных материалов, руб./т.

В технико-экономическом учете сахарного производства расходы сырья, материалов и топлива выражаются в процентах от массы переработанного сырья (свеклы):

$$M_{cb} = \frac{M_{cb} \times УР_{cb}}{100} \quad (4)$$

$$M_t = \frac{M_{cb} \times УР_t}{100} \quad (5)$$

$$M_{bm} = \frac{УР_{bm} \times M_{cb}}{100} \quad (6)$$

$$M_{cx} = \frac{M_{cb} \times B_{cx}}{100} \quad (7)$$

$$3_{п} = \frac{3_{пу} \times M_{cb}}{100} \quad (8)$$

Формулы (4–8) определяют величину расхода соответственно сырья, топлива, материалов и заработной платы на 100 кг сырья (сахарной свеклы). Так как в экономических расчетах расходы ресурсов соотносятся с величиной выхода готовой продукции, то подставляя зависимости (4–8) в уравнение (3), получим аналитическую формулу для расчета себестоимости:

$$СБ = \frac{100 \times \Pi_{cb} + УР_t \times \Pi_t + УР_{и} \times \Pi_{и} + \sum УР_{bm} \times \Pi_{bm} + 3_{пу}}{B_{cx}} \quad (9)$$

где 100 обозначает удельный расход сахарной свеклы $УР_{cb}$, равный 100 %; $УР_t$ – удельный расход топлива, %; $УР_{и}$ – удельный расход извести, %; $\sum УР_{bm}$ – удельный расход других вспомогательных материалов, %; $3_{пу}$ – удельный расход заработной платы, в % от стоимости переработанной свеклы.

Чтобы оценить показатели эффективности производственной составляющей выработки сахара целесо-

образно использовать так называемую технологическую себестоимость ($СБ_{\tau}$):

$$СБ_{\tau} = \frac{100 \times Ц_{св}}{В_{сх}} + \frac{УР_{\tau} \times Ц_{\tau}}{В_{сх}} + \frac{УР_{и} \times Ц_{и}}{В_{сх}} \quad (10)$$

Данную расчетную формулу преобразуем, заменив выход сахара ($В_{сх}$) на произведение сахаристости ($СХ_{св}$) и коэффициента завода ($К$):

$$СБ_{\tau} = \frac{100 \times Ц_{св}}{К \times СХ_{св}} + \frac{УР_{\tau} \times Ц_{\tau}}{В_{сх}} + \frac{УР_{и} \times Ц_{и}}{В_{сх}} \quad (11)$$

На основе использования показателя технологической себестоимости расчетная формула для оценки удельной прибыли будет такова:

$$УП = Ц_0 - \left(\frac{100 \times Ц_{св}}{К \times СХ_{св}} + \frac{T \times Ц_{\tau}}{В_x} + \frac{T_i \times Ц_{и}}{В_x} \right) \quad (12)$$

Важно вести учет влияния уровня производительности завода на технологическую себестоимость: $СБ_{\tau}/П_p$, где $П_p$ – производительность завода за сезон.

Технологическая эффективность сахарного производства напрямую определяется долей стоимости свеклы, топлива и материалов в технологической себестоимости 1 т сахара. В данном случае, если доля затрат на сахарную свеклу в технологической себестоимости составляет около 92 %, то следует говорить о заводе первой группы технологической эффективности (расход топлива – 6–6,5 %); если 89–90 % – завод второй группы технологической эффективности (расход топлива – 8,5–9 %) [12]. Проведенные расчеты на примере объекта исследования показали, что доля стоимости свеклы в технологической себестоимости сахара за последние три сезона составляла 92,1 %, что относит его к заводу первой группы технологической эффективности.

Результаты научных опытов (отечественных и зарубежных) и учетная практика отраслевого хозяйствования показывают, что технологические улучшения способны снизить производственно-технологические издержки более чем на 70 % (снижение уровня удельного расхода топлива, известняка, вспомогательных материалов) и положительным образом отражаться на общей эффективности и конкурентоспособности отраслевых предприятий.

В рамках проведенного исследования были выделены наиболее актуальные на текущий момент направления рационализации отраслевых производственно-технологических процессов, в том числе:

- известково-углекислотная очистка свекловичного сока;
- выпаривание диффузионного сока;
- уваривание и кристаллизация утфелей (кристаллы сахарозы и межкристалльный раствор).

В настоящее время существует большое количество способов известково-углекислотной очистки сока, каждый из них имеет как положительные, так и отри-

цательные стороны. Подробно рассмотрим основные направления реализации более эффективных технологических решений на этапе известково-углекислотной очистки свекловичного сока [4, 6–8].

1. На этапе предварительной дефекации важно обеспечить высокие показатели осаждения неорганических примесей и органических высокомолекулярных соединений. При этом сам образующийся осадок должен быть устойчив к воздействию щелочной среды (рН) и температур (t , °С). Наиболее оптимальным температурным режимом следует считать 30–40 °С, однако в рамках реализации принципа ресурсосбережения (вторичное использование тепла утфельных паров и их конденсатов) применяется температурный режим 55–60 °С.

2. Процесс дефекации должен сопровождаться максимально высоким уровнем разложения неорганических примесей и органических соединений, а также способствовать накоплению извести на этапе I сатурации. В процессе очистки происходит существенная трансформация высокомолекулярных соединений на более простые, которая должна быть полностью завершена до процесса выпаривания. В качестве критериев оценки эффективности технологического процесса на данном этапе следует привести: содержание редуцирующих веществ (не более 0,02 %); разложение амидов (max); аминокислотный состав остается прежним.

Таким образом, процесс очистки существенно зависит от температуры (t , °С), уровня щелочной среды (рН) и продолжительности работы. Показатель щелочности непосредственно определяется количеством используемой извести (CaO), но ее влияние ограничено. Так, при концентрации извести 1,4–1,5 % обеспечивается максимальный уровень рН, равный 12,2 ед.; при дальнейшем увеличении уровень рН остается практически постоянным. Если продолжительность процесса очистки сократить на 10 мин, то фильтрационные свойства останутся приемлемыми, но качество сахарного сиропа снизится. С ростом температуры (> 50 °С) отмечается замедление процесса фильтрации по причине увеличения осадочной части, поэтому важно поддерживать температуру среды не более 50 °С.

3. В рамках этапа I сатурации основной задачей является выделение в растворе $CaCO_3$ и проведение за счет него очистки несхаров (адсорбции). Максимальная эффективность данного процесса достигается при щелочности раствора, соответствующего массовой доле CaO (негашеная известь) – 0,11–0,12 %. Увеличение доли извести приводит к повышению качества очистки: если рН возрастет с 10,7 до 11,1, то эффективность очистки увеличивается с 32 до 36 %, при этом от температуры качество процесса практически не зависит. Оптимальная продолжительность первой стадии составляет 10 мин; если продолжительность процесса будет меньше отмеченного значения, то обеспечить оптимальный уровень рН представляется невозможным. Эффективность очистки диф-

фузионного сока от несахаров с каждой сатурацией снижается – на второй сатурации несахаров удаляется в 3 раза меньше, чем на этапе предефекации.

4. На этапе II сатурации необходимо обеспечить требуемый уровень щелочности ($\text{pH} \approx 8,0\text{--}8,5$). Также должен соблюдаться оптимальный температурный режим ($\geq 95^\circ\text{C}$).

5. Актуальной задачей для отраслевых заводов является снижение либо более эффективное использование всех видов ресурсов, стоимость которых перманентно увеличивается на рынке. В частности, значительным резервом снижения является уменьшение расхода извести. Как отмечают отраслевые эксперты, это возможно реализовать на практике за счет таких факторов, как качество исходного сырья (сахарная свекла); технико-технологическое обеспечение процесса фильтрования; технология очистки диффузионного сока. В процессе известково-углекислотной очистки диффузионного сока удаляется порядка 40 % всех несахаров. Таким образом, устанавливая лабораторным путем количественное содержание несахаров в диффузионном соке посредством применения уравнения Фрейндлиха (13), можно рассчитать оптимальный расход извести (CaO):

$$a/m = 0,651 \times C^{0,3} \quad (13)$$

где a/m – количество адсорбированного вещества на единицу массы адсорбента; C – концентрация адсорбента в растворе [28–30].

Общий алгоритм расчета оптимального расхода извести:

- 1) рассчитывается содержание несахаров путем разности количества сухих веществ и сахарозы;
- 2) выносятся максимальное количество несахаров, которое может быть удалено из диффузионного сока (40 % от общего содержания);
- 3) исходя из эффективности станции очистки рассчитывается фактическое количество несахаров, которое будет удалено из диффузионного сока – a ;
- 4) обозначается разность между максимальным количеством несахаров, которое возможно удалить из диффузионного сока, и фактическим – C ;
- 5) подставив значения полученных параметров в уравнение (13), можно рассчитать оптимальный расход извести (m), который пойдет на очистку диффузионного сока:

$$m = a / (0,651 \times C^{0,3}) = 1,78 \% \text{ к массе свеклы} \quad (14)$$

Данный расчетный алгоритм целесообразно использовать именно в оперативном контроле расхода извести.

Проведенные исследования позволили определить перечень наиболее действенных решений по сокращению расхода извести в процессе очистки диффузионного сока [3–6, 8, 31]:

Обеспечение тщательной подготовки известкового молока с содержанием в нем CaO (не менее 270–310 г/л при плотности 1,19–1,22 г/см³) и предупреждение перерасхода на очистку за счет автоматизации системы дозирования.

Более тщательная отмывка свеклы, способствующая снижению песка в твердом балласте и растворимых кремниевых соединений в диффузионном соке, а также улучшению фильтрационных свойств очищенного сока.

Исключение или сведение к минимуму возврата сока I сатурации на предварительную дефекацию, что способствует уменьшению продуктового верстата и снижению расхода извести на 0,25–0,30 % к массе свеклы.

Максимальное снижение откачки диффузионного сока, способствующее меньшему расходу известкового молока.

Исключение падения уровня сока в напорных сборниках меньше нижнего предела, используя для фильтрования все оборудование с целью уменьшения сопротивления фильтрующей перегородки.

Обеспечение постоянного контроля соотношения расчетного и фактического расхода известкового молока.

Снижение расхода извести на дефекации перед II сатурацией в 1,5–2 раза за счет рационального регламента на предварительной и основной дефекации будет обеспечивать минимальное содержание в соке веществ, образующих растворимые соли кальция.

Использование для обессахаривания суспензии сока I сатурации камерных фильтров, способных отделить осадок с более низкими фильтрационными свойствами, полученными при очистке сока с меньшим расходом извести.

Отрицательной стороной известково-углекислотной очистки диффузионного сока является остаточное содержание солей кальция. Среди основных причин такового можно выделить: превышенное количество аминокислот, побочных веществ распада инвертного сахара и пектиновых соединений из-за нарушения технологических режимов; применение в технологическом процессе барометрической воды; высокие показатели щелочности; пересатурирование диффузионного сока.

Наиболее экономически целесообразны актуальны и способы снижения концентрации солей кальция в диффузионном соке [4–6, 12, 14].

1. Повышение величины натуральной щелочности сока II сатурации. При переработке свеклы с низкой натуральной щелочностью получить сироп со щелочной реакцией можно тремя способами:

- сок II сатурации сатурировать до более высокой щелочности (0,03 % CaO , что примерно на 0,005–0,01 % выше оптимальной), что увеличивает концентрацию растворимых солей кальция и позволяет избежать получения кислых сиропов;
- перед или после II сатурации добавлять в сок каустическую соду (NaOH), где она превращается в кальци-

нированную соду (Na_2CO_3). Расход каустической соды при этом будет в два раза больше, чем кальцинированной. Если сода вводится в смеси с тринатрийфосфатом (Na_3PO_4), то такую смесь рекомендуется добавлять только после сатурации. Этот способ позволяет получить более термоустойчивый сок с меньшим отложением солей кальция на выпарной станции, однако важно учитывать, что эти реагенты могут образовывать мелассы;

– перед II сатурацией вместо соды вводится часть оксида магния (MgO), после чего сок пересатурируется до щелочности 0,01 % CaO . Оставшуюся часть MgO добавляют после сатурации, перед фильтрацией. Способ позволяет снизить содержание солей кальция в соке примерно на 50 %. Катион Mg^{++} является слабым мелассообразователем. Расход оксида магния составляет 0,25 кг на 1 т свеклы, что эквивалентно расходу кальцинированной соды.

2. Умягчение сока при помощи ионообмена:

– наиболее эффективным является один из способов Грилуса и TASCRO, где исключен сброс регенерационных стоков на очистные сооружения. Раствор гипса вместе с питательной водой поступает в диффузионную установку. Однако следует учитывать, что при температуре свыше 65 °C гипс выпадает в виде осадка в трубопроводах.

Обозначим основные аспекты совершенствования процесса выпаривания диффузионного сока. Данный процесс существенно влияет на конечные показатели качества и потребительские свойства готового продукта (сахара свекловичного), такие как разложение сахарозы, повышение цветности сока, изменение щелочности сока, образование осадков.

1. Разложение сахарозы. Процесс распада сахарозы на моносахариды зависит от температуры среды, продолжительности выпаривания и концентрации сухих веществ. На рисунке 1 приведена экспериментальная кривая степени разложения сахарозы от температуры воздействия. При этом общая продолжительность всего процесса составляла 60 мин, а концентрация сахарозы – 15 %.

Потери сахарозы на данном этапе обусловлены рядом причин: паровой поток, пенообразование, отсутствие должного уровня герметизации паровой камеры [32]. Если исходное сырье – хорошего качества, а режим работы выпарной установки соответствует технико-технологическим требованиям, то потери сахарозы не превышают 0,1 %.

2. Повышение цветности сока. Показатель цветности может изменяться из-за нарушения режима межкорпусной циркуляции и переизбытка диффузионного сока. Кроме того, на цветность негативно влияет недостаток извести при низкой температуре и увеличенной продолжительности выпаривания сока.

3. Изменение щелочности сока. Показатель щелочности может как повышаться, так и понижаться, в частности, первое может быть обусловлено ростом

концентрации кислых солей ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и KHCO_3) при пересатурации, а второе – распадом амидов до аминокислот.

4. Образование осадков. В процессе выпаривания жидкость испаряется, а концентрация сухих веществ возрастает, что приводит к выпадению в осадок плохо растворимых солей (CaSO_4 , CaSO_3). Для предотвращения прикипаний на корпусах выпарных аппаратов применяются ингибиторы, механизмы действия которых зависят от их состава. Масса накипи при переработке 1 тонны сахарной свеклы колеблется от 1 до 4 г и зависит от таких факторов, как качество свеклы, скорость циркуляции, удельное напряжение нагревательной поверхности, конструкция выпарных аппаратов, частота чистки, состав накипи, методы очистки фильтрационного сока и концентрация сухих веществ.

Ключевые особенности процесса выпаривания фильтрационного сока [6, 7, 12, 14]:

– при сгущении сока на поверхности теплообмена образуется примерно 200 мг осадка на 1 кг несахаров очищенного сока. Из этого объема 80 % осажается на нагревательных поверхностях корпусов, а 20 % находится во взвешенном состоянии в виде шлама;

– увеличение скорости циркуляции сока до 1,1 м/с позволяет снизить количество накипи на поверхности нагрева примерно в 2 раза, однако дальнейшее увеличение скорости до 3 м/с не дает заметного эффекта. Распределение накипи по длине трубки остается неравномерным: на экономайзерном участке ее откладывается в 2–3 раза меньше, чем на испарительном;

– скорость циркуляции по-разному влияет на накипеобразователи: при отрицательном коэффициенте растворимости осадки требуют высокой скорости циркуляции для их удаления с нагревательной поверхности, тогда как при положительном – небольшие скорости потока способны предотвращать их пригорание;

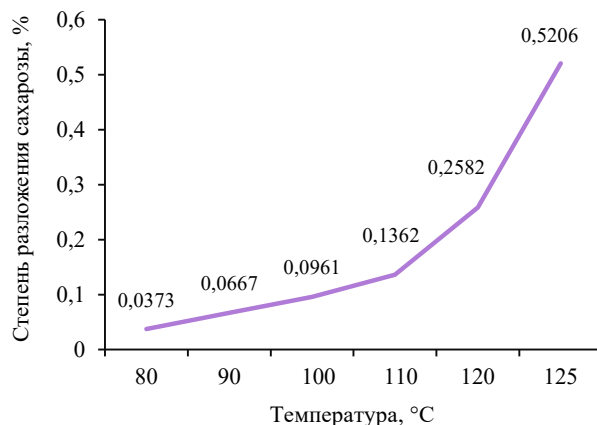


Рисунок 1. Зависимость разложения сахарозы от температуры (составлено авторами на основе источника [33])

Figure 1. Effect of temperature on sucrose decomposition [33]

– кальциевые соли кремниевой кислоты особенно вредны для теплопередачи, т. к. образуют наиболее твердую накипь, равномерно оседающую на всех корпусах выпарной установки. В отдельных случаях их концентрация возрастает в последних корпусах, что усугубляет проблему;

– количество накипи, отлагающейся в корпусах выпарной станции, варьируется следующим образом: I ступень – до 15 %; II ступень – 25–30 %; III ступень 40–50 %; IV ступень – до 10 %. При одинаковой толщине слоя накипи снижение коэффициента теплопередачи на I ступени более значительное, чем на IV. Поэтому к очистке выпарной станции целесообразно приступать, когда толщина осадка на I ступени составляет не более 0,5 мм, а на IV – не более 3 мм.

Определенные оксиды, такие как F_2O_3 и Al_2O_3 , обычно присутствуют только в первых корпусах выпарной установки. Их растворимость существенно зависит от щелочности раствора (рис. 2).

Еще одним из важнейших компонентов накипи является карбонат кальция ($CaCO_3$). Основное его содержание также сосредоточено в первых корпусах. Показатель его растворимости обратно пропорционально связан с ростом уровня сухих веществ в фильтрационном соке и прямо пропорционально – с ростом температуры среды. Максимальный показатель концентрации данной соли в накипи иногда может составлять ~40 %.

Гипсовая накипь ($CaSO_3$, $CaSO_4$) может накапливаться в значительных объемах, что сказывается на ее плотности и теплопроводности. При повышении плотности теплопроводность возрастает: для гипсовой накипи она составляет 1,5–2,0 Вт/мК, тогда как у пористой накипи – не более 0,5–0,8 Вт/мК [12].

Ключевым фактором экономии в процессе уваривания и кристаллизации утфелей является рациональное расходование пара при оптимальной продолжитель-

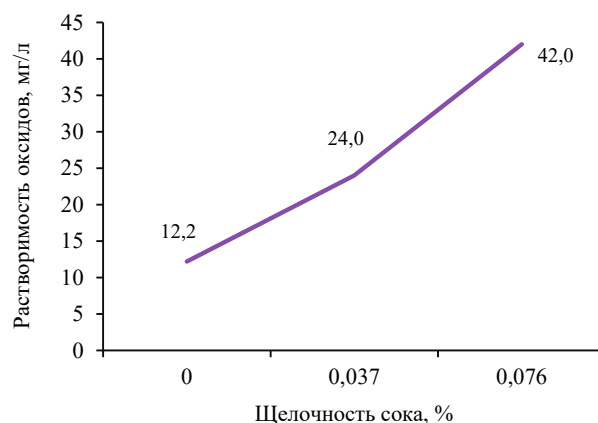


Рисунок 2. Зависимость растворимости оксидов от щелочности сока (составлено авторами на основе источника [4])

Figure 2. Effect of juice alkalinity on oxide solubility [4]

ности. Для поддержания баланса между скоростью выпаривания и кристаллизации необходимо соблюдать пропорцию: на 1 кг сахара в пересыщенном состоянии должно приходиться 60 м² суммарной поверхности растущих кристаллов. Также важно придерживаться принципа многоступенчатости, который повышает эффективность процесса.

Экспериментальные зависимости размеров кристаллов от чистоты утфельных масс представлены в таблице 3. Если соблюсти режим экономии расхода топлива, то в рамках двухпродуктовой схемы размер кристаллов будет составлять не более 0,3–0,4 мм, а если будет применяться трехпродуктовая схема, то данный показатель будет составлять уже 0,6–0,7 мм.

В процессе кристаллизации очень важно соблюдать точную дозировку затравки и маточного утфеля.

Таблица 3. Зависимость размера кристалла от чистоты утфельных масс

Table 3. Effect of massecuite purity on crystal size

Кристаллическая структура утфеля	Чистота утфеля, %	Необходимая кристаллическая основа и очередность кристаллизации				Размер кристаллов производственного утфеля, мм	Кратность кристаллизации
		Паста (Слурри) $d = 0,008–0,01$ мм	Холодный кристаллизат $d = 0,01$ мм	Маточный утфель I $d = 0,2–0,3$ мм	Маточный утфель II $d = 0,5–0,6$ мм		
Утфель I							
Мелкий кристалл	90–94	+	+			0,3–0,4	2
Средний кристалл	90–94	+	+	+		0,6–0,7	3
Крупный кристалл	90–94	+	+	+	+	0,9–1,0	4
Утфель II	83–87	+	+	+		0,5–0,6	3
Утфель III	75–77	+	+			0,2–0,3	2

Примечание: Составлено авторами на основе источника [12].

Note: Compiled by the authors [12].

Расчетная формула для определения объема затраченной пасты (V_3 , л):

$$V_3 = \frac{V_{\text{пасты}} \times M_y \times K \times d^3}{100 \times M_{\text{сх.п.}} \times D^3} \quad (17)$$

где $V_{\text{пасты}}$ – объем получаемой пасты, л; M_y – масса получаемого утфеля, кг; $M_{\text{сх.п.}}$ – масса сахара пасты, кг; K – содержание кристаллов в готовом утфеле, %; d – размер частиц пасты, мм; D^3 – размер кристаллов готового утфеля, мм.

С учетом среднеотраслевых показателей отдельных параметров ($V_{\text{пасты}} = 5,145$ л; $M_{\text{сх.п.}} = 1,82$ кг) формула (17) принимает вид:

$$V_3 = \frac{0,002827 \times M_y \times K \times d^3}{100 \times M_{\text{сх.п.}} \times D^3} \quad (18)$$

Для расчета количества маточного утфеля, которое необходимо ввести в вакуум-аппарат при уваривании основного утфеля, применяется расчетная формула:

$$M_m = \frac{M_y \times K \times d^3}{K_m \times D^3} \quad (19)$$

Уровень потерь сахара в мелассе зависит от ее общего объема, а также процентного содержания сахара и несахаров. Приведенные показатели зависят от качества перерабатываемой свеклы и параметров диффузионного сока. Экспериментальным путем установлено, что если чистота диффузионного сока изменяется на 1 %, то содержание сахара в мелассе – на 0,15 %. Из этого следует, что качество исходного сырья (сахарной свеклы) является ключевым фактором, оказывающим воздействие на уровень выхода сахара (табл. 4).

Способы минимизации остатков сахара в мелассе, которые наиболее часто применяются на современных отраслевых производствах [3–6]:
– уваривание утфелей при пониженной температуре, что приводит к снижению содержания сахара в межкристалльном растворе;

– поддержание сухих веществ, чистоты, содержания кристаллов в утфеле на оптимальном уровне, исходя из параметров нормативной мелассы;
– недопущение снижения концентрации сухих веществ утфеля при пропаривании вакуум-аппарата, не более 0,5 %;

– доведение сваренного утфеля в процессе его кристаллизации до оптимальных параметров перед центрифугированием. При снижении концентрации сухих веществ перед центрифугированием ниже оптимальной величины на 1 % потери сахара в мелассе возрастают на 0,15 % к массе свеклы;

– выдерживание кристаллоструктуры утфеля I на уровне 0,5–0,7 мм. При увеличении среднего размера кристаллов сахара на 0,05 мм концентрация сухих веществ отделяемой мелассы возрастает на 0,7–1,0 %. Чистота мелассы уменьшается на 1 %, а содержание сахара в ней – на 0,1 % к массе свеклы соответственно;

– исключение разбавления утфеля перед центрифугированием водой и возможности его охлаждения;

– постоянный контроль работы центрифуг, когда разница между чистотой межкристалльного оттека и заводской мелассы не должна превышать 0,5 %. Проскок мелких кристаллов сахара через сито центрифуги в количестве 1 % приводит к увеличению чистоты мелассы на 0,3 %. Через сито с размером ячеек 40 и 60 мкм в оттек проскакивает 0,1–1,5 и 0,4–2,2 % мелких кристаллов соответственно, т. е. замена сита с размером ячеек 60 мкм на сито с размером ячеек 40 мкм снижает чистоту мелассы на 0,5 %.

В рамках оперативного контроля выполняется оценка частоты нормативной мелассы:

$$Ч_{\text{н.м.}} = Ч_c - Э_k \quad (20)$$

где $Ч_c$ – чистота сиропа, %; $Э_k$ – эффект кристаллизации, %, (~30–35 %).

Концентрации сухих веществ рассчитывается по следующей формуле:

$$СВ_{\text{н.м.}} = 75,5 + 0,2t \quad (21)$$

где t – температура центрифугируемого утфеля, °С.

Таблица 4. Потери сахара в мелассе в зависимости от чистоты диффузионного сока

Table 4. Effect of diffusion juice purity on sugar loss in molasses

Чистота диффузионного сока, %	Эффект очистки диффузионного сока, %	Чистота сиропа, %	Чистота мелассы, %	Потери сахара в мелассе, % к массе свеклы
84	26,6	87,8	55,3	2,37
85	28,5	88,8	56,3	2,22
86	29,1	89,7	57,2	2,13
87	31,7	90,3	58,3	1,99
88	33,4	91,3	58,8	1,89
89	35,2	92,6	60,1	1,72
90	37,0	93,5	61,0	1,58
91	38,8	94,3	61,8	1,43

Примечание: Составлено авторами на основе источника [14].

Note: Compiled by the authors [14].

Оценка сахара в утфеле ведется по формуле:

$$CX_{\text{ут.}} = \frac{100(CX_{\text{н.м.}} + K) - K \times CX_{\text{н.м.}}}{100} \quad (22)$$

где $CX_{\text{н.м.}}$ – содержание сахара в нормативной мелассе, %; K – количество кристаллов в утфеле, %.

Оценка содержания сухих веществ центрифугируемого утфеля проводится по формуле:

$$CX_{\text{п.у.}} = \frac{100A_{\text{м.}} + CB_{\text{п.у.}}}{A_{\text{м.}}} \quad (23)$$

где $A_{\text{м.}}$ – концентрация несахаров в воде в нормальной мелассе, которая выражается отношением:

$$A_{\text{м.}} = \frac{HCX}{H_2O} \quad (24)$$

Оценка чистоты центрифугированного утфеля проводится по формуле:

$$Ч_{\text{п.у.}} = \frac{CX_{\text{п.у.}}}{CB_{\text{п.у.}}} \cdot 100 \quad (25)$$

Выводы

На основе общепромышленных данных производственного учета была установлена корреляционная связь между результирующим параметром (выход сахара) и воздействующими факторами (производительность; сахаристость; потери свеклы и сахара; расход условного топлива и извести). Исходя из этого, были составлены линейные модели множественной регрессии, в рамках каждой выполнен расчет коэффициента детерминации и проведена оценка значимости коэффициентов модели на базе t -статистики. Окончательный выбор лучшей модели был сделан на основе критериев Акаике (AIC) и Шварца (BIC).

Установлено, что наибольшее влияние на выход сахара оказывают следующие факторы: среднесуточная производительность; сахаристость свекловичной стружки; фактические потери сахара в производстве; фактический расход условного топлива. Оценка коэффициентов модели была проведена методом наименьших квадратов (МНК). Апробация методического подхода к оценке технологической эффективности сахарного производства показала, что предприятие относится к первой группе отраслевых заводов. Пред-

ложенную расчетную модель целесообразно применять на тактическом уровне управления для оценки эффективности смен, проведения анализа в режиме реального времени и оперативного выявления проблем. Доказано, что совершенствование управления технологическими процессами может снизить расход топлива без значительных затрат, увеличив доходность и качество продукции. Применение методов математического моделирования, в частности регрессионно-статистических методов, позволяет рассчитывать на получение заданных параметров свеклосахарного производства, технологически улучшающих его производственные и управленческие характеристики, а использование прогрессивных методик и способов – более эффективно организовать переработку свеклы на сахарных заводах (+32 %), уменьшить расход известнякового камня (~23 %), топлива (~18 %) и вспомогательных материалов (~14 %).

Критерии авторства

С. К. Мизанбекова – инициатор и организатор проекта. И. П. Богомолова – руководство исследованием, контроль и оценка результатов. И. Н. Василенко – обработка информации, проведение расчетов, обоснование результатов, формулировка выводов и составление рекомендаций. Н. М. Шатохина – сбор информации, обоснование перспективности использования различных методов и подходов к обработке информации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

S.K. Mizanbekova initiated and organized the project. I.P. Bogomolova supervised the research and assessed the results. I.N. Vasilenko was responsible for the data processing, calculations, verification, conclusions, and recommendations. N.M. Shatokhina wrote the review.

Conflict of interest

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

Список литературы / References

1. Белкин Р. Е., Векленко Е. В., Золотарев А. А., Михилев А. В. Государственная поддержка производства сахарной свеклы. Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2. С. 15–17. [Belkin RE, Veklenko EV, Zolotarev AA, Mihilev AV. State support for sugar beet production. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2022;(2):15–17. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SYJHQP>
2. Болохонцева Ю. И. Свеклосахарный подкомплекс: обоснование перехода на инновационный путь развития. Региональная экономика: теория и практика. 2023. № 19. С. 57–63. [Bolohonceva YuI. Sugar beet subcomplex: Justification for innovative development shift. Regional Economics: Theory and Practice. 2023;(19):57–63. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/NTKDJP>
3. Быканова С. А. Факторы, замедляющие развитие научно-технического прогресса в свеклосахарном подкомплексе АПК. Вестник Курской сельскохозяйственной академии. 2022. № 3. С. 23–25. [Bykanova SA. Development

inhibitors in sugar beet scientific and technological progress. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2022;(3): 23–25. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TTYLYH>

4. Громковский А. И., Громковский А. А. Моделирование результатов производства сахара по технико-экономическим факторам. *Сахар*. 2020. № 10. С. 46–49. [Gromkovskii AI, Gromkovskii AA. Modeling the results of sugar production based on technical and economic factors. *Sugar*. 2020;(10):46–49. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/DUMJAN>

5. Золотарева Е. Л., Архипов К. В. Ресурсосберегающие технологии – приоритетное направление развития растениеводства. *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2021. № 7. С. 51–53. [Zolotareva EL, Arhipov KV. Resource-saving technologies as first-priority line to develop plant growing. *Economy of agricultural and processing enterprises*. 2021;(7):51–53. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/NYEAZD>

6. Круглик С. В. Об оптимизации технологии на отдельных стадиях производства сахара. *Сахар*. 2020. № 4. С. 27–35. [Kruglik SV. Optimizing the technology at individual sugar production stages. *Sugar*. 2020;(4):27–35. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/POAAJY>

7. Перевертова Т. А. Проблемы обеспечения инновационного развития свеклосахарного комплекса России. *Социально-экономические явления и процессы*. 2020. № 2. С. 84–89. [Perevertova TA. Problems of ensuring of innovative development of the beet sugar complex of Russia. *Socio-economic Phenomena and Processes*. 2020;(2):84–89. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QATHRZ>

8. Полухин А. А., Алпатов А. В., Ставцев А. Н., Алексеев К. И., Романов А. Д. и др. Технический потенциал производства сахарной свеклы как фактор эффективного развития отрасли. *Сахарная свекла*. 2022. № 2. С. 12–14. [Polukhin AA, Alpatov AV, Stavtsev AN, Alekseyev KI, Romanov AD, et al. Technical potential of manufacture of a sugar beet as the factor of effective development of branch. *Sugar Beet*. 2020;(2):12–14. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QIMENV>

9. Солошенко Р. В. Совершенствование механизма эффективного функционирования свеклосахарного подкомплекса АПК. *Экономические науки*. 2013. № 99. С. 123–127. [Soloshenko RV. Improving the efficiency of the sugar beet agro-industrial subcomplex. *Economic Sciences*. 2013;(99):123–127. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QJFZVX>

10. Итоги 2024: сахар и свекла (25-12-2024). Торговая площадка Grain Business. [Results for 2024: Sugar and beetroot (25-12-2024). Grain Business Trading Platform. [cited 2025 Feb 12]. (In Russ.)] Available from: <https://www.grain-business.ru/news/anevs-ikar-15339/>

11. Иванов Е. В. Как проходит свеклосахарная кампания России в сезоне 2022/2023. *Сахарная свекла*. 2022. № 10. С. 10–14. [Ivanov EV. How is Russia's sugar beet campaign going in the 2022/2023 season. *Sugar Beet*. 2022;(10):10–14. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/SVLGNQ>

12. Громковский А. И., Громковский А. А., Громковская Н. А. Оценка эффективности свеклосахарного производства с учетом урожайности свеклы и длительности сезона. *Сахар*. 2018. № 2. С. 42–45. [Gromkovskii AI, Gromkovskii AA, Gromkovskaia NA. Efficiency of sugar beet production based on sugar beet yield and season length. *Sugar*. 2018;(2):42–45. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YWXQIQ>

13. Balandin D, Egamov A, Kuzenkov O, Pristavchenko O, Vildanov V. Mathematical modelling and optimization of scheduling for processing beet in sugar production. In: Balandin D, Barkalov K, Meyerov I, editors. *Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies*. MMST 2022. Communications in Computer and Information Science. Switzerland: Springer Nature; 2022;(1750):227–238. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24145-1_19

14. Gromkovskii AI, Gromkovskii AA, Gromkovskaia NA. Economic and mathematical model of the profit of sugar production from beets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;(5):052005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/5/052005>

15. Krstić M, Agnusdei GP, Tadić S, Miglietta PP. Prioritization of e-traceability drivers in the agri-food supply chains. *Agricultural and Food Economics*. 2023;11:42. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00284-5>

16. Rao M, Bast A, de Boer A. Understanding the phenomenon of food waste valorisation from the perspective of supply chain actors engaged in it. *Agricultural and Food Economics* 2023;11:40. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00279-2>

17. Cristobal-Fransi E, Daries N, Cardona JR, Del Río-Rama M de La C. Challenges of digitization in the social economy in times of pandemic: The evolution of online presence and e-commerce in agri-food cooperatives. *Agricultural and Food Economics*. 2023;11:49. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00291-6>

18. Trentinaglia MT, Baldi L, Peri M. Supporting agriculture in developing countries: New insights on the impact of official development assistance using a climate perspective. *Agricultural and Food Economics*. 2023;11:39. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00282-7>

19. Громковский А. И., Громковский А. А., Громковская Н. А. Технико-экономический анализ свеклосахарного производства. *Сахар*. 2017. № 7. С. 20–23. [Gromkovskii AI, Gromkovskii AA, Gromkovskaia NA. Technical and economic analysis of sugar beet production. *Sugar*. 2017;(7):20–23. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ZBIVHH>

20. Contini C, Boncinelli F, Piracci G, Scozzafava G, Casini L. Can blockchain technology strengthen consumer preferences for credence attributes? *Agricultural and Food Economics*. 2023;11:27. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00270-x>

21. Матвейкин В. Г., Дворецкий С. И., Минько Л. В., Таров В. П., Чайников Л. Н. и др. Инновационный потенциал: современное состояние и перспективы развития. М.: Машиностроение-1; 2019. 284 с. [Matveikin VG, Dvoretzky SI, Minko LV, Tarov VP, Chaynikov LN, *et al.* Innovative potential: Current state and development prospects. Moscow: Mashinostroenie-1; 2019. 284 p. (In Russ.)]
22. Winter E, Grovermann C, Messmer MM, Aurbacher J. Assessing seed and breeding interventions for organic farming using a multiagent value chain approach. *Agricultural and Food Economics*. 2023;11:22. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00262-x>
23. Кочетков С. В., Кочеткова О. В. Инновационный потенциал промышленных предприятий: определение и динамика развития. Россия: тенденции и перспективы развития. 2017. № 12–2. С. 34–38. [Kochetkov SV, Kochetkova OV. Innovative potential of industrial enterprises: Definition and dynamics of development. Russia: Trends and development prospects. 2017;(12–2):34–38. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/ZOCBLL>
24. Мингалева Ж. А., Платынюк И. И. Оценка уровня инновационного развития предприятия. Креативная экономика. 2011. № 4. С. 52–58. [Mingaleva ZhA, Platynyuk II. Assessment of enterprise innovative development level. *Creative Economy*. 2011;(4):52–58. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/NDUVBL>
25. Лисин Б., Фридлянов В. Инновационный потенциал как фактор развития. Инновации. 2002. № 7. С. 17–34. [Lisin B, Fridlyanov V. Innovative potential as a development factor. *Innovations*. 2002;(7):17–34. (In Russ.)]
26. Oñederra-Aramendi A, Begiristain-Zubillaga M, Cuellar-Padilla M. Characterization of food governance for alternative and sustainable food systems: A systematic review. *Agricultural and Food Economics*. 2023;11:18. <https://doi.org/10.1186/s40100-023-00258-7>
27. Amanful B, Dogbe ES, Bosman CA, Gorgens JF. Stochastic techno-economic analysis for the co-production of alternative sweeteners in sugarcane biorefineries. *Food and Bioproducts Processing*. 2024;143:9–20. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.10.006>
28. Картаев Ф. С. Введение в эконометрику. М.: Проспект; 2020. 472 с. [Kartaev FS. Introduction to Econometrics. Moscow: Prospect; 2020. 472 p. (In Russ.)]
29. Усачева И. В. Методический подход к развитию инновационного потенциала промышленных предприятий. Организатор производства. 2021. № 3. С. 67–74. [Usatcheva IV. A methodic approach to industrial enterprises' innovation potential development. *Organizer of Production*. 2021;(3):67–74. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/PDEJKN>
30. Page S. The model thinker: What you need to know to make data work for you. NY: Basic Books; 2018. 427 p.
31. Hamel BT, Harman M. Can government investment in food pantries decrease food insecurity? *Food Policy*. 2023; 121:10–25. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102541>
32. Krasnoff SM, Schmit TM, Bilinski CB. Economic impact assessment of public incentives to support farm-to-school food purchases. *Food Policy*. 2023;121:25–45. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102545>
33. Максимова Е. Сладкий доход. Сахарная свекла вернула статус одной из самых рентабельных агрокультур. Агроинвестор. 2023. № 2. [Maksimova E. Sweet income. Sugar beet has regained its status as one of the most profitable agricultural crops. *Agroinvestor*. 2023;(2). [cited 2024 Jan 25] (In Russ.)] Available from: <https://www.agroinvestor.ru/analytics/article/39732-sladkiy-dokhod-sakharnaya-svekla-vernula-status-odnoy-iz-samykh-rentabelnykh-agrokultur/>