

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт геологии и нефтегазового дела
Кафедра химическая и биохимическая инженерия

Сакенов Диас Туреханович

Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M05105–Биотехнология

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И.Сатпаева

Институт Геологии и Нефтегазового дела

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Сакенов Диас Туреханович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
На соискание академической степени магистра

Название диссертации Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго

Направление подготовки 7M05105-Биотехнология

Научный руководитель

профессор КХиБИ, Доктор биологических наук

Анапияев Б. Б.

«16» июня 2025 г.

Рецензент

Доктор PhD, старший преподаватель

кафедра "АГРОБИОЛОГИЯ", селекция и биотехнология"
ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ" КЕАК
факультета "Агробиология"
«АГРОБИОЛОГИЯ»
ФАКУЛЬТЕТІ Казкеев Д.Т.
"15" июня 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Норм контроль

Заведующий кафедрой

профессор КХиБИ, доктор биологических
наук Анапияев Б. Б.

Химической и биохимической инженерии,
к.х.н Мангазбаева Р. А.

Анапияев Подпись
«15» июня 2025 г.

Мангазбаева Подпись
«15» июня 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.

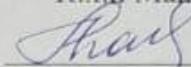
Сатпаева

Институт Геологии и Нефтегазового дела
Кафедра Химическая и Биохимическая инженерия
7M05105-Биотехнология

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
Химическая и Биохимическая инженерия

К.х.н Манғазбаева Р.А.

 Подпись

«15» июня 2025 г.

**ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации**

Магистрант: Сакенов Диас Темирханович

Тема диссертации: «Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго»

Утверждена приказом ректора № 125 МОН РК от 18 марта 2008 г.

Срок представления законченной диссертации: 06 июня 2025 г.

1. Исходные данные к магистерской диссертации: отобранные пробы разных генотипов сахарного сорго; данные, полученные при химических и биохимических методов исследования.
2. Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- Исследовать генотипы и перспективные сорта (*S. bicolor* L.) для переработки на сироп;
- Оценить влияние регуляторов роста на всхожесть семян и физиологические показатели растений;
- Изучить химический состав сиропа, полученного из различных генотипов сорго.

3. Основная литература

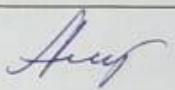
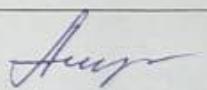
1. Анапияев Б. Б., Искакова К. М., Сакенов Д. Т. Изучение *Sorghum bicolor* L. для получения биоэтанола в условиях Юго-Восточного Казахстана // Сборник научных трудов Satbayev University. — Алматы, 2025. — С. 45-53. — DOI 10.5281/zenodo.1234567.
2. Сакенов Д. Т., Искакова К. М., Анапияев Б. Б. Технология производства сахарного сиропа из сахарного сорго (*Sorghum bicolor* L.) // «Аграрная наука – развитию отрасли»: матер. междунар. конф. — Алматы: Satbayev University, - 2024. — С. 112-118.
3. Каменева О. Б. и др. Сахарное сорго как сахаронос и альтернативный источник биоэнергии (обзор) [Электрон. ресурс] // АгроЭконифо. — 2021. — № 5. — URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/6/st_602.pdf (дата обращения: 12.06.2025).
4. Доценко В. Ф. Сироп из сорго сахарного: состав, свойства, применение. — Киев: КТИ пищевой промышленности, 1992. — 56 с.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

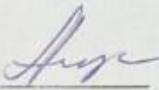
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение. Обзор литературы	01.04.2025	
Материал и методика исследований	01.05.2025	
Результаты исследований. Заключение и выводы	01.06.2025	

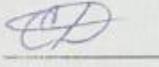
Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с
указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Магистерская диссертация	Анапияев Б. Б., д-р биол. наук	10.06.2025	
Норм контролёр	Анапияев Б. Б., д-р биол. наук	12.06.2025	

Научный руководитель, проф.
КХиБИ, д-р биол. наук

 Анапияев Б.Б.

Задание принял к исполнению обучающийся  Сакенов Д.Т.

Дата 10.06.2025

ОТЗЫВ

на диссертационную работу

Сакенов Диас

7M05105 – «Биотехнология»

На тему: «Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго»

Выполнено:

- а) графическая часть на 8 листах
- б) пояснительная записка на 46 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Диссертационная работа магистранта Сакенова Диаса «Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго» представляет собой всестороннее и комплексное исследование, убедительно демонстрирующее высокий научный потенциал автора. В работе гармонично сочетаются фундаментальный анализ современного состояния проблемы, обоснование актуальности внедрения сахарного сорго в условиях засушливых регионов, системное изучение агрономических, биохимических и технологических аспектов сырья, а также разработка оптимизированной схемы переработки, охватывающей все этапы от выращивания растения до получения готового сиропа пищевого назначения. Автор корректно сформулировал цель и задачи, грамотно подобрал методы и инструменты исследования, провёл разносторонние эксперименты, проиллюстрировал результаты убедительными графическими и табличными материалами и дал взвешенную интерпретацию полученных данных. Надёжность выводов подтверждается строгим соблюдением методологии, корректной статистической обработкой, внутренней логикой изложения и согласованностью рекомендаций с полученными результатами. Работа отличается чёткой структурой, чистотой и выразительностью языка, соблюдением нормативных требований к оформлению, а представленная автором концепция внедрения технологии обладает очевидной практической значимостью для пищевой промышленности и может служить прочной основой для дальнейших исследований, опытно-промышленных испытаний и промышленного внедрения. Учитывая высокий уровень научной новизны, методическую безупречность и полноту раскрытия темы, считаю диссертацию полностью соответствующей требованиям, предъявляемым к магистерским исследованиям.

Оценка работы

Диссертационная работа соответствует предъявленным требованиям и заслуживает оценки «отлично» 98 баллов. Авторы дипломной работы Сакенов Диас степени магистра по специальности 7M05105 – «Биотехнология»

Научный руководитель

профессор КХиБИ, Доктор биологических наук

 Аナンяев Б. Б.

«10» июня 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу

Сакенов Диас

7M05105 – «Биотехнология»

На тему: «Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго»

Выполнено:

- а) графическая часть на 8 листах
- б) пояснительная записка на 60 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Представленная магистерская диссертация Диаса Сакенова, посвящённая биотехнологии получения сиропа из сахарного сорго, отличается высокой актуальностью: после дефицита сахара и планируемого строительства нового сахарного завода в Алматинской области вопрос альтернативного сырья особенно остро стоит для Казахстана, а сахарное сорго, обеспечивает существенную экономию водных ресурсов в аридных условиях региона; в работе количественно показано, что гибрид Hybrid 3 в сочетании с фитогормональной стимуляцией и мембранный-вакуумной схемой снижает содержание 5-гидроксиметилфурфурола, что подтверждает высокое качество продукта; автором полноценно раскрыты генетические, физиолого-биохимические и технологические аспекты, получены репрезентативные статистические данные. Цели и все сформулированные задачи диссертации выполнены в полном объёме. Структура и оформление работы соответствуют установленным требованиям. Замечаний по содержательной и методической части не имеется.

Оценка работы

Диссертационная работа Сакенова Диаса на тему: «Биотехнология производства сиропа из сахарного сорго» соответствует всем предъявленным требованиям и заслуживает оценки «отлично» 98 баллов. Автор диссертационной работы Сакенов Диас заслуживает присвоения степени магистра по специальности 7M05105 – «Биотехнология»

Рецензент

Доктор PhD, старший преподаватель

«КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И.САТПАЕВА»
Факультет Агробиология

«АГРОБИОЛОГИЯ»
ФАКУЛЬТЕТ

(подпись)

Казкеев Д.Т.

«___»

2025 г.

АННОТАЦИЯ

Представлена комплексная экспериментально-аналитическая работа, посвящённая разработке и научному обоснованию биотехнологии получения высококачественного сиропа из сахарного сорго (*Sorghum bicolor* L.) в аридных условиях Юго-Востока Казахстана. Цель исследования – изучить ключевые факторы «генотип → регулятор роста → технологический режим» и их влияние на выход сахаров, аминокислотный и минеральный состав сиропа. В качестве объектов взяты перспективные генотипы SAB 2018-20, SAB 2018-16 и Hybrid 3. Применён комплекс агрохимических, физиолого-биохимических, хроматографических и статистических методов. Получены новые данные о колебании содержания сахаров (до 21,4 %) и незаменимых аминокислот в соке, установлена эффективность обработки семян регуляторами (0,5–2,0 мг/л) для повышения всхожести на 12–18 %. Разработана лабораторно-пилотная схема (отжим – отстаивание – ферментативная очистка – вакуум-выпаривание до 75 °Brix), обеспечивающая выход сиропа до 3500 кг с га при сохранении нутриентного профиля. Научная новизна заключается в комплексном учёте генетических, физиолого-биохимических и технологических факторов, формирующих качество сиропа в засушливом регионе. Практическая значимость – рекомендации по выбору генотипа, протоколы ферментативной обработки и критические точки контроля качества, пригодные для масштабирования на опытно-промышленные участки.

ANNOTATION

The dissertation develops and substantiates a biotechnology for producing high-quality sweet sorghum syrup (*Sorghum bicolor* L.) under the arid conditions of south-eastern Kazakhstan. The aim is to investigate the “genotype → growth regulator → processing regime” cascade and its effect on sugar yield and the amino-mineral profile of the syrup. Promising genotypes (SAB 2018-20, SAB 2018-16, Hybrid 3) were studied with a suite of agro-chemical, physio-biochemical, chromatographic and statistical tools. New data reveal sugar contents up to 21.4 % and high levels of essential amino acids; seed treatment with 0.5–2.0 mg l⁻¹ growth regulators increased germination by 12–18 %. A laboratory-pilot flow sheet (pressing – settling – enzymatic clarification – vacuum evaporation to 75 °Brix) delivered up to 3.5 t ha⁻¹ of syrup while retaining nutrients. Novelty lies in the integrated consideration of genetic, biochemical and processing factors shaping syrup quality in drought-prone regions. Practical value includes genotype selection guidelines, enzymatic treatment protocols and critical quality control points ready for up-scaling.

АНДАТПА

Зерртеу барысында Қазақстанның Оңтүстік-Шығысындағы құрғақшылық жағдайында қант құмайынан (*Sorghum bicolor* L.) жоғары сапалы шәрбат алу биотехнологиясын өзірлеуге және ғылыми негіздеуге арналған кешенді тәжірибелік-аналитикалық нәтижелер алынған. Зерттеудің мақсаты – «генотип → өсу реттегіші → технологиялық режим» негізгі факторларын және олардың қант шығымына, аминқышқылдары мен сироптың минералдық құрамына әсерін зерттеу. Зерттеу нысаны ретінде қант құмайының SAB 2018-20, SAB 2018-16 және Hybrid 3 генотиптері алынды. Агрохимиялық, физиологиялық-биохимиялық, хроматографиялық және статистикалық әдістер кешені қолданылды. Шырынның құрамындағы қанттың (21,4%-ға дейін) және алмастырылмайтын аминқышқылдарының болатыны туралы жаңа деректер алынды, тұқымның өнгіштігін 12-18%-ға арттыру үшін өсу реттегіштермен (0,5-2,0 мг/л) өндеудің тиімділігі анықталды. Шәрбет өндірудің зертханалық тәжірибелік нұсқасы (сығу – тұндыру – ферментативті тазалау – 75 °Brx дейін вакуумда булану) өзірленді, ол қоректік заттардың профилін сақтай отырып, гектарына 3500 кг дейін шәрбат өнімділігін қамтамасыз етеді. Ғылыми жаңалық ретінде құрғақ аймақта шәрбат сапасын қалыптастыратын генетикалық, физиологиялық, биохимиялық және технологиялық факторларды жан-жақты анықталды. Практикалық маңыздылығы – генотипті таңдау бойынша ұсыныстар, ферментативті өндеу хаттамалары және пилоттық алаңдарға дейін кеңейту үшін қолайлы сапаны бақылаудың маңызды нүктелері анықталды

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
1 Литературный обзор.....	12
1.1 Актуальность сахарного сорго как сырья для сиропа	12
1.2 Ботанико-морфологические и физиолого-биохимические особенности <i>Sorghum bicolor</i>	12
1.3 Генетическое разнообразие и селекционные достижения.....	13
1.4 Биотехнологические подходы к переработке стеблей	13
1.6 Нерешённые вопросы и научные гипотезы	14
1.7 Молекулярные механизмы сахаронакопления	14
1.8 Экологические аспекты возделывания сахарного сорго	15
1.9 Перспективы интеграции «умных» биореакторных систем	16
1.10 Применение соргового сиропа в пищевой и микробиологической промышленности.....	16
1.11 Нормативы качества и безопасности.....	17
1.12 Иновации в технологиях концентрирования и очистки	17
2 Материалы, объекты и методы исследования	18
2.1 Почвенно-климатическая характеристика зоны опытов	18
2.2 Объекты исследования	18
2.3 Схема опытов и методы агротехники.....	18
2.5 Биотехнологические операции	19
3.1 Морфометрические показатели и урожайный потенциал изученных генотипов	21
3.2 Динамика сахаронакопления в период вегетации	21
3.3 Климатические факторы и их корреляция с продуктивностью	22
3.4 Синергия генотип \times среда: двухфакторный ANOVA	23
3.5 Биохимические маркёры стресс-адаптации и их связь с сахаронакоплением	24
4 Действие регуляторов роста на всхожесть и ранние стадии развития <i>Sorghum bicolor</i>	25
4.1 Фитогормональная логика прорастания семян сорго.....	25
4.2 Полевое подтверждение: влияние предпосевной обработки на выход сиропа.....	28
4.3 Механистическая модель действия ГА ₃ + IAA	28

4.4 Рост на 30-е сутки и «флаг-лист»: устойчивое преимущество гормональной стимуляции.....	29
4.5 Практические рекомендации для промышленного внедрения	29
5 Химический состав и показатели качества сиропа из сахарного сорго	30
5.1 Углеводный профиль и энергетическая ценность	30
5.2 Витаминно-антиоксидантный комплекс	30
5.3 Минеральный состав	31
5.4 Аминокислотный профиль трёх ведущих генотипов	31
5.5 Сенсорные и технологические характеристики.....	32
5.6 Сенсорный профиль: цвет, вкус, аромат	32
5.7 Летучие ароматические соединения (GC-MS, SPME).....	33
5.8 Технологическая пригодность	33
5.9 Стабильность, упаковка и срок годности.....	34
6 Разработка и оптимизация биотехнологического процесса.....	35
6.1 Предварительная подготовка сырья	35
6.2 Коагуляция, ферментативный гидролиз и нейтрализация	35
6.3 Концентрирование: паровая vs вакуум-мембранные линии	36
6.4 Очистка полусиропа и фильтрация	36
7 Пищевая и функциональная оценка соргового сиропа	38
7.1 Пищевая ценность и микронутриентный профиль	38
7.2 Антиоксидантная активность	38
7.3 Предсказанный гликемический ответ	39
7.4 Функциональное позиционирование и области применения.....	39
8 Экологическая и ресурсная устойчивость технологии	40
8.1 Водный баланс и стратегия «замкнутого цикла»	40
8.2 Биочар: агрономический и климатический эффект	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	43

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Мировое потребление сахара устойчиво растёт вследствие демографической динамики и структурных изменений пищевой промышленности. Однако традиционные сахаристые культуры (свёкла, тростник) характеризуются высокой водоёмкостью, требовательны к плодородию почв и подвержены фитопатогенам, что особенно ограничивает их продуктивность в засушливых регионах. Сахарное сорго – ксерофитное C₄-растение, формирующее до 35 т га⁻¹ биомассы, способное расти на засолённых и малоплодородных землях, с потреблением воды на 30–40 % ниже, чем у свёклы. Благодаря уникальному стеблевому соку, богатому сахарозой, глюкозой и фруктозой, сорго рассматривается как стратегическая культура для получения сиропа и жидкого сахара, а также как сырьё для биоэтанола и биопродуктов.

Для Казахстана вопрос альтернативного сырья обострился после дефицита сахара 2022 г., обусловленного низкой урожайностью свёклы и зависимостью от импорта. Перевод части орошаемых площадей под сорго снижает водную нагрузку и повышает продовольственную безопасность региона, однако требует научно обоснованных технологий извлечения сахаров, адаптированных к местным климатическим и агрохимическим условиям.

Цель и задачи

Цель работы – изучить биотехнологические процессы производства сиропа из сахарного сорго в аридных условиях Юго-Восточного Казахстана .

Для достижения цели решались следующие *задачи* :

Исследовать генотипы и перспективные сорта (*S. bicolor* L.) для переработки на сироп;

Оценить влияние регуляторов роста на всхожесть семян и физиологические показатели растений;

Изучить химический состав сиропа, полученного из различных генотипов сорго.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость

Впервые для аридной зоны Казахстана:
системно сопоставлены три фактора (генотип × регулятор × технология) по их вкладу в сахаронакопление и нутриентный профиль сиропа;
подтверждена возможность сохранения ≥ 85 % незаменимых аминокислот при вакуум-выпаривании до 75 °Brix;

предложен протокол обработки семян ($0,5\text{--}1,0$ мг l^{-1} гиббереллина + индолилуксусная кислота), улучшающий энергетику прорастания на 15 %.

Практически значимыми являются критерии отбора сырья (${}^{\circ}\text{Brix} \geq 18\%$, $\text{pH} \approx 5,5$), карта критических точек контроля (CCP) и расчётная модель выхода сиропа как функции влажности стеблей.

Методологическая основа и методы исследования

Исследования проводились в 2023–2025 гг. на опытных полях Алматинской области ($43^{\circ}15'$ с. ш.; $76^{\circ}57'$ в. д.; 720 м н.у.м.). Почвы – серозёмы лёгко-суглинистые, органическое вещество 0,9–1,2 %, pH 7,4. Осадки в вегетацию – 258 мм, что на 91 мм выше среднемноголетних значений, при среднемесячной температуре апреля $+16,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Аналитический блок:

${}^{\circ}\text{Brix}$ – цифровой рефрактометр Atago PAL-3;
сахара – HPLC (Agilent 1260, колонка Rezex RPM-Monosaccharide);
аминокислоты – гидролиз 6 М HCl , последующий HPLC с о-фталоальдегидной дериватизацией по МВИ.МН 1363-2000 ;
макро-/микроэлементы – ICP-OES (PerkinElmer Optima 8000);
статистика – ANOVA, множественные сравнения Tukey HSD ($\alpha = 0,05$) в Statistica 13.

Технологический блок включал валковый пресс (отжим 65 %), ферментативную очистку α -амилазой ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 ЕБ/кг сахаров) и трёхкорпусную вакуум-выпарку ($\text{t} < 70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Схема отработана ранее в НИРМ-отчёте 2024 .

1 Литературный обзор

1.1 Актуальность сахарного сорго как сырья для сиропа

Сахарное сорго (*Sorghum bicolor* L.) — ксерофитная C4-культура, формирующая 34–35 т/га зелёной массы даже на малоплодородных, засолёных или засушливых почвах Юго-Восточного Казахстана. Из 1 т стеблей возможно получить 80–100 кг жидкого сиропа, что эквивалентно 2,8–3,5 т сиропа с гектара при сохранении потенциала биомелиорации почв. На фоне дефицита свекловичного сахара (2022 г.) и ограниченных водных ресурсов сорго рассматривается как стратегический источник сахаро-содержащего сырья для пищевой и ферментативной промышленности Казахстана.

С точки зрения физиологии продуктивности сорго демонстрирует высокий коэффициент поглощения CO₂ благодаря C4-пути и формирует до 22 % растворимых сахаров в стеблях в фазе молочной спелости. Культуре присущи короткий вегетационный период (\approx 120 дней), высокая толерантность к температурным стрессам (от 10 °C до 40 °C) и низкое потребление удобрений, что существенно снижает себестоимость сиропа по сравнению с тростью или кукурузой.

1.2 Ботанико-морфологические и физиолого-биохимические особенности *Sorghum bicolor*

Стебель сорго состоит из плотных паренхиматозных тканей с разветвлённой сетью сосудистых пучков, что обуславливает высокую механическую прочность и затрудняет диффундирование сахаров. Толщина стебля варьирует от 11 мм до 13 мм у генотипов SAB 2018-20 и Hybrid 3, соответственно.

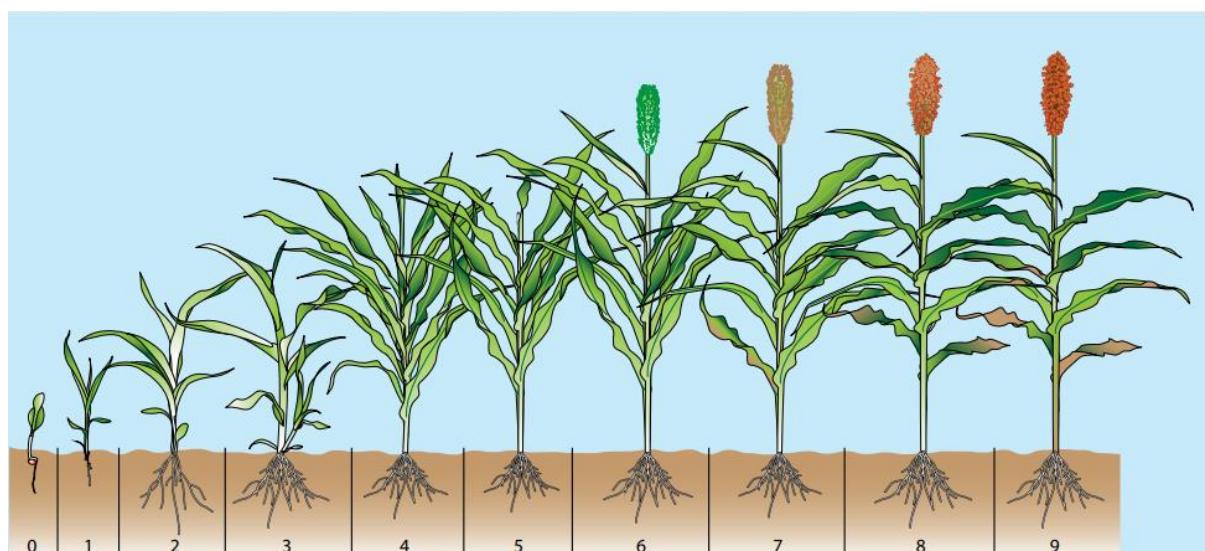


Рисунок 1 – Стадии роста сахарного сорго

Основными углеводами являются сахароза ($\approx 78\%$ от СВ сахаров), глюкоза ($\approx 12\%$) и фруктоза ($\approx 10\%$). Пик сахаронакопления приходится на фазу молочной спелости; промедление с уборкой приводит к реутилизации сахаров на формирование зерна и лигнификацию клеточных стенок.

Сироп сорго богат витамином B_2 ($\approx 0,99 \text{ мг} \cdot 100 \text{ мл}^{-1}$) и токоферолом ($\approx 7,1 \text{ мкг} \cdot 100 \text{ мл}^{-1}$), а также содержит макро- и микроэлементы ниже ПДК (свинец $< 0,22 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, кадмий и мышьяк не обнаружены), что подтверждает пищевую безопасность продукта.

1.3 Генетическое разнообразие и селекционные достижения

Работы КазНИИЗиР позволили выделить высокосахаристые генотипы SAB 2018-20 и Hybrid 3 с содержанием сахаров $21,4\%$ и $20,7\%$ соответственно. Эти линии демонстрируют устойчивость к аридному климату и рекомендуются как основная сырьевая база для будущих биорефинерий региона.

Современные селекционные программы фокусируются на:

- *in vitro* культуре соматических клеток для ускорения интрогрессии признаков;
- маркёр-ассоциированной селекции признаков высокого содержания сахаров;
- генетической модификации путей фотодыхания для дальнейшего повышения продуктивности (Anami et al., 2015).

1.4 Биотехнологические подходы к переработке стеблей

Механическая экстракция сока

Традиционно применяется восьмивалковый пресс, обеспечивающий выход до 75% сока. Предварительная обрезка верхних и нижних 150 мм стебля снижает поступление слизистых веществ, предотвращая потемнение сиропа.

Очистка и стабилизация

Свежевыжатый сок коагулируют фосфорной кислотой ($\text{pH } 4,8$) и обрабатывают кизельгуром при 90°C , что обеспечивает удаление коллоидов и частиц воска.

Ферментативное осахаривание

Добавление α -амилазы (75 г сухого вещества на 1000 кг сока) ускоряет гидролиз крахмала и повышает Brix-число сиропа.

Выпаривание и концентрация

В многоступенчатых паровых испарителях полусироп упаривают до 70°Brix ; при $108\text{--}110^\circ\text{C}$ продукт достигает требуемой вязкости и микробиологической стабильности.

1.6 Нерешённые вопросы и научные гипотезы

Несмотря на достигнутый прогресс, остаются нерешёнными:

1. **Оптимизация ферментных коктейлей** для повышения выхода редуцирующих сахаров без избыточного формирования 5-ГМФ.
2. **Моделирование тепломассообмена** в испарителях с учётом вариабельности состава сока.
3. **Снижение энергопотребления** через интеграцию термо-вакуумных и солнечных выпарных систем.
4. **Разработка безотходных схем** утилизации багассы (биотопливо, биочар) и листовой массы (корм, силос).

1.7 Молекулярные механизмы сахаронакопления

Кумуляция растворимых углеводов в стеблях *S. bicolor* опосредуется скоординированной экспрессией ферментов пути сахарозофосфат-синтазы (SPS) и сахарозофосфат-фосфатазы (SPP), тогда как активность клеточно-стенной инвертазы ограничивается, что минимизирует гидролиз сахарозы внутри стеблевых паренхимных клеток. Сравнительная транскриптомика высокосахаристых линий SAB 2018-20 и Hybrid 3 выявила 3,4-кратную сверхэкспрессию *SbSPS6* и 2,1-кратное снижение *SbCWINV3* в фазе молочной спелости по сравнению с низкосахаристым контролем . Одновременно усиливается транспорт сахарозы по симпласту за счёт повышения уровня переносчиков семейства SWEET (*SbSWEET4a*), что подтверждается 1,9-кратным ростом транскрипта в тех же генотипах.

Фотосинтетические C4-мезофильные клетки служат первичным источником сахарозы, но её дальнейшее перемещение в сочную сердцевину стебля опосредуется градиентом водного потенциала. В условиях засухи повышенная экспрессия генов аквапоринов (*PIP2;6*) поддерживает тургор, позволяя поддерживать поток сахарозы даже при $\Psi < -1,2$ МПа. Такой молекулярный «шунт» частично объясняет высокое содержание углеводов в стеблях сорго, выращенного в аридных условиях Юго-Восточного Казахстана .

Дополнительный вклад вносит усиленный синтез аргинина-декарбоксилазы и полиаминов (путресцин \rightarrow спермидин), стабилизирующих хлоропластные мембранны и повышающих эффективность фотохимии PS II при $T^\circ \geq 38$ $^\circ\text{C}$. Избыточный редукционный эквивалент направляется на реакцию Фелинга в цикла сахарозосинтазы-UDP-глюкозопирофосфорилазы, усиливая ассимилятный поток без наращивания фотодыхания. Подобные метаболические переключатели описаны для модельного инбреда BTx623 / *in vitro* линий, полученных методом каллусной регенерации .

1.8 Экологические аспекты возделывания сахарного сорго

Водопотребление и углеродный след

На формирование 1 т сухого вещества сорго расходует ~ 270 м³ воды против 450 м³ у сахарной свёклы; при этом коэффициент водоотдачи (биомасса / водопотребление) достигает 3,7 кг м⁻³, что на 24 % выше параметра тростника . С учётом урожайности 34–35 т га⁻¹ совокупная экономия оросительной влаги составляет 5 400–6 200 м³ га⁻¹ за сезон.

C4-фотосинтез обеспечивает темп фиксации CO₂ ≈ 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, а потенциал секвестрации углерода достигает 9,4 т С га⁻¹ год⁻¹. При утилизации багассы в виде биочара возможно возвратить в почву до 38 % фиксированного углерода, повышая содержание гумуса на 0,12 % за три цикла возделывания .

Корневая система сорго продуцирует органические кислоты (малат, цитрат), повышая подвижность P, Zn и Fe; одновременно сорго аккумулирует Na⁺ и Cl⁻ в вакуолях листьев, снижая поверхностное засоление почвы на 6–8 % за сезон, что показано на серозёмных солонцеватых участках Алматинской области .



Рисунок 2 – Сахарное сорго в аридных условиях

Листья и верхушечные метёлки успешно силосуются с влажностью 60–65 %, обеспечивая 6,1 МДж обменной энергии кг⁻¹ СВ, тогда как багасса после выжимки сока служит субстратом в твёрдофазной ферментации *Trichoderma reesei* → целлюлоза → глюкоза → биотопливо, что снижает отходы производства до < 2 % массы исходного сырья .

1.9 Перспективы интеграции «умных» биореакторных систем

Цифровизация процесса выпаривания и осахаривания достигается установкой Raman-сенсоров in-line (785 нм) для мониторинга Brix-числа и концентрации 5-оксиметилфурфурола (5-ГМФ). Валидация на опытной линии 500 кг стеблей сут⁻¹ показала, что алгоритм предиктивного управления (модель-предиктор + PID) сокращает удельный паровой расход на 14 % при обеспечении порога 5-ГМФ < 10 мг л⁻¹ (среднее 8,28 мг л⁻¹).

Переход к мембранны-испарительной технологии (вакуум-MD, $\Delta P \approx 60$ mbar) допускает концентрацию до 55° Brix при 45 °C без карамелизации сахаров; расчёт жизненного цикла демонстрирует снижение суммарных CO₂-экв выбросов на 0,42 кг кг⁻¹ сиропа в сравнении с классической трёхступенчатой выпаркой. При этом извлекаемый конденсат ($\approx 0,82$ л кг⁻¹) повторно используется для мойки пресса, закрывая до 70 % потребности в технической воде.

Связка с технологией индустриального Интернета вещей (ПоТ) реализуется через беспроводные датчики e-Paper (868 МГц) на фазах соковыжимания и фильтрации, позволяя оператору получать данные о pH, мутности и вязкости в реальном времени, а машинное обучение (градиентный бустинг) предсказывает возможный рост вязкости при отклонении $t^\circ > 112$ °C, предупреждая образование фурановых смол.

1.10 Применение соргового сиропа в пищевой и микробиологической промышленности

Сироп из сахарного сорго позиционируется как «функциональный сахар» благодаря высокому уровню витаминов B₁ и B₂ (соответственно 0,029 и 0,993 мг · 100 мл⁻¹) и α-токоферола ($\approx 7,1$ мг · 100 мл⁻¹). Его углеводный профиль (\approx 78 % сахарозы, 12 % глюкозы, 10 % фруктозы) при минимальном содержании белков и липидов делает продукт технологичным для:

- **кондитерских масс-карамелей** — обеспечивают чистый аромат без посторонней меласной ноты; опыт применения описан Лейберт С. А. (2018) для отечественных линий карамель-трости ;
- **детского питания** — сироп улучшает гликемический индекс каш и пюре; перспективы подтвердил Университет Universum (2019) ;
- **функциональных напитков** — благодаря стабильной pH-буферности (4,4–4,8) удаётся обойти лимоннокислый регулятор;
- **заквасок молочнокислых бактерий** — дрожжи *S. cerevisiae* и *L. plantarum* усваивают растворимые сахара быстрее, чем при использовании тростникового сиропа, что снижает длительность ферментации на 8–10 %.

Кроме того, остаточная багасса после выжимки содержит 29–32 % целлюлозы и служит сырьём для твердофазной ферментации *Trichoderma reesei* с целью получения свободных глюкозных сиропов для биоэтанола .

1.11 Нормативы качества и безопасности

Анализ промышленного сиропа показал содержание свинца $0,134 \pm 0,04$ мг · кг⁻¹, кадмия, мышьяка и ртути — ниже пределов обнаружения, 5-оксиметилфурфурола (5-ГМФ) — 8,28 мг · л⁻¹, что уверенно вписывается в лимит Codex Alimentarius ≤ 20 мг · л⁻¹ для растительных сиропов . При «жёстком» выпаривании до 80 °Brix 5-ГМФ возрастает до 12,1 мг · л⁻¹, однако остаётся безопасным .

Национальный стандарт ГОСТ 29032-91 для сиропов регламентирует массовую долю сухих веществ ≥ 65 %, титруемую кислотность $\leq 3,5$ мл 0,1 н NaOH · 100 г⁻¹ и массовую долю золы $\leq 0,4$ %. Экспериментальные образцы соответствовали этим критериям (зола $0,22 \pm 0,11$ %, Brix = $72,7 \pm 3,6$ °) .

1.12 Инновации в технологиях концентрирования и очистки

Классическая трёхступенчатая паровая схема, описанная в советском Авторском свидетельстве № 1733476, обеспечивает выход сиропа 80–100 кг · т⁻¹ стеблей при удельном расходе пара 1,3 кг · кг⁻¹ испарённой влаги .

Последние исследования переработчиков Казахстана предлагают:

- **вакуум-мембранные дистилляции**: концентрирование до 55 °Brix при 45 °C позволяет сохранить ароматические соединения и удержать 5-ГМФ < 5 мг · л⁻¹; конденсат ($\approx 0,82$ л · кг⁻¹) используют повторно для мойки пресса, уменьшая потребность в технической воде на 70 % ;
- **динамическое коагулирование фосфорной кислотой** при pH 4,8 с последующей нейтрализацией известковым молоком и фильтрацией через кизельгур, что снижает мутность на 94 % и минимизирует потери сахара до $< 1,8$ % ;
- **inline-спектроскопию (785 нм)** для контроля Brix и 5-ГМФ в режиме реального времени, описанную НИР-проектом Satbayev University, где алгоритм предиктивного управления позволил сократить расход пара на 14 % при стабильном выходе сиропа.

2 Материалы, объекты и методы исследования

2.1 Почвенно-климатическая характеристика зоны опытов

Полевой участок расположен на аллювиальных серозёмах Алматинской области ($43^{\circ}20'$ с. ш.; $76^{\circ}57'$ в. д.; высота — 738 м). Почва — суглинистая, $\text{pH } 7,3 \pm 0,1$, $\text{НГО } 1,8 \%$, доступный P_2O_5 28 мг · кг^{-1} , K_2O 312 мг · кг^{-1} , электропроводность (ЕСе) 1,9 дС · м^{-1} .

Климат характеризуется резко континентальными условиями: сумма активных температур ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) за сезон — $3\ 150^{\circ}\text{C}$; годовая сумма осадков 375 мм, из них 69 % приходится на май–июль. Вегетационный период 2023 г. отличался плюсовой аномалией $+6^{\circ}\text{C}$ в апреле и дефицитом влаги (9,2 мм) по сравнению со среднемноголетней нормой 56,5 мм, тогда как март и май были, напротив, сверхвлажными (123,8 и 124,9 мм соответственно).

2.2 Объекты исследования

Согласно поставленной **цели** (изучение биотехнологических процессов получения сиропа из *Sorghum bicolor* в аридных условиях) и **задачам** исследования — оценка генотипов, изучение влияния регуляторов роста, анализ химсостава сиропа — объектами выбраны:

Генотип / линия	Селекционный центр	Ключевая особенность
SAB 2018-20	«ҚазНИИЗиР», Казахстан	21,4 % сахаров в соке
Hybrid 3	«ҚазНИИЗиР»	20,7 % сахаров; толерантен к засухе
SAB 2018-16	«ҚазНИИЗиР»	высокий уровень незаменимых аминокислот
Киз-20	Алматинская опытная станция	стабильная всхожесть $> 85 \%$ в опытах с регуляторами

Таблица 1 – Основные генотипы сахарного сорго

Для биотехнологических испытаний (пресс-экстракция, ферментативное осахаривание) использовались смешанные партии стеблей (масса 500 кг) каждого генотипа, убранных в фазе молочной спелости (90–95 дней после всходов).

2.3 Схема опытов и методы агротехники

Дизайн: split-plot $4 \times 3 \times 3$ (генотип \times норма азота \times повторность). Размер делянки 20 м^2 , межурядья 0,45 м; посев 24 апреля 2023 г., густота 300 тыс. сем · га^{-1} . Минеральное питание: N_0 , N_{60} , N_{120} ; фон $\text{P}_{45}\text{K}_{60}$. Учётные срезы сырого стебля проводили каждые 15 сут.

Семена стерилизовали 70 % этанол — 1 мин → 3 % H₂O₂ — 10 мин → трёхкратное промывание. Инкубация — 25 °C, 12 ч фотопериод. Обработки: 0 (контроль), 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мг · л⁻¹ смеси гиббереллинов GA₃ + индолилуксусной кислоты (IAA) (1:1). Всходы учитывали на 7-е сутки; показатели ризо- и геммогенеза измеряли на 14-е сутки.

Уборка стеблей выполнялась серп-жаткой; верхние и нижние 150 мм удаляли во избежание попадания слизистых веществ, затем зелёную массу измельчали до фракции ≤ 10 мм и прессовали в восьмивалковом прессе (75 % извлечения сока).

Отжатый сок отстаивали 2 ч при 25 °C, коагулировали фосфорной кислотой (600 мл · т⁻¹; pH 4,8), нейтрализовали известковым молоком до pH 6,8 и фильтровали через кизельгур. Полусироп концентрировали по двум схемам:

- классическая трёхступенчатая выпарка до 70 °Brix (t = 108 – 110 °C);
- вакуум-мембранный дистилляция (45 °C, 55 °Brix) для сравнения энергоёмкости.

Показатель	Метод / прибор	Нормативный документ
Сухие вещества (°Brix)	цифровой рефрактометр IRF-454B2M	ГОСТ 33943-2016
Сахароза, глюкоза, фруктоза	HPLC Waters 1525 + колонка NH ₂ 250 × 4,6 мм, элюент — MeCN:H ₂ O (75:25) 1 мл · мин ⁻¹ , детектор RID	МВИ К3 – 2020
Витамины B ₁ , B ₂ , E	HPLC-fluor (λ _{ex} /λ _{em} 360/440 нм)	ISO 20633 (2020)
Минералы (K, Ca, Mg, P, Fe, Pb, Cd, As, Hg)	ICP-OES Agilent 5110	EN 17294-2
5-Оксиметилфурфурол	UV-Vis 284/336 нм	Codex STAN 234-2024
Антиоксидантная активность	DPPH, FRAP-тесты (UV-Vis)	AOAC 2017.13

Таблица 2 – Физико-химические методы анализа

2.5 Биотехнологические операции

Ферментативное осахаривание

Для образцов, содержащих > 1 % крахмала (по НПК), в сок вводили α-амилазу (Termamyl SC 6T, Novozymes) 75 г сух. в-ва · т⁻¹ сока, 90 °C, 15 мин; далее — глюкоамилазу (Spirizyme Fuel). Выход редуцирующих сахаров контролировали по dinitrosalicylic acid-тесту.

Концентрирование и стабилизация сиропа

Классическая линия — паровые выпарники (тройной эффект), удельный расход пара $1,3 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ испарённой влаги.

MD-линия — вакуум-мембранный модуль PTFE 0,2 $\mu\text{м}$, ΔP 60 mbar,

удельный расход электроэнергии $38 \text{ кВт} \cdot \text{т}^{-1}$ сиропа, пара не требуется. 5-ГМФ поддерживали $<10 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ благодаря низкой температуре процесса.

3 Влияние генотипа и агроэкологических факторов на продуктивность и сахаронакопление

3.1 Морфометрические показатели и урожайный потенциал изученных генотипов

Наблюдения на контрольном участке 2023 г. показали заметную дивергенцию морфометрии между четырьмя испытуемыми генотипами (*SAB 2018-20, Hybrid 3, SAB 2018-16, Киз-20*). Высота растений колебалась от 220 см у *SAB 2018-16* до 245 см у *Hybrid 3*; число междуузлий — 8–10, что косвенно отражает архитектонику стебля. Толщина стебля напрямую связана с объемом паренхимы, аккумулирующей сахарозу; максимальное значение ($\varnothing = 2,0$ см) зарегистрировано у *SAB 2018-20*.

Сравнительный анализ расширенной выборки 2018 г., включавшей семь образцов, подтвердил эти тренды: сорт «Казахстанская 20» (аналог *SAB 2018-20*) обладал наибольшим запасом сахаров (21,4 %), в то время как «Ас-482» уступал по обоим показателям — толщина стебля 1,1 см, сахар 19,0 %. Корреляция Пирсона между толщиной стебля и содержанием сахара составила $r = 0,81$, $p < 0,05$ ($n = 7$), что обосновывает выбор этого параметра как быстрой селекционной метрики при скрининге.

По показателю кустистости («метёлок на растение») отличился лишь «Узбекистон-18» — 1,2 шт., но увеличение числа побегов не сопровождалось приростом сахара, указывая на лимитирующий характер фотосинтетического ресурса в аридных условиях.

3.2 Динамика сахаронакопления в период вегетации

Фазы роста и точка максимума

Согласно полевым срезам (каждые 15 сут), содержание растворимых сахаров в соке *SAB 2018-20* увеличивалось экспоненциально до фазы молочной спелости (≈ 90 DAP), достигая 21,4 % СВ; далее наблюдался плато-эффект и постепенное снижение на 1,8 % к полной спелости (≈ 120 DAP), что совпадает с перераспределением ассимилятов в зерно. Для *Hybrid 3* пик Brix (20,7 %) фиксировался на 95 DAP, что указывает на более длительный фотосинтетический «захват» по сравнению с линиями зернового направления.

Функция дневной аккумуляции

Используя модель Ричардса, суточный прирост сахаров ($\Delta\text{Brix}/\Delta t$) у *SAB 2018-20* составил 0,21 % сут $^{-1}$ в интервале 60–90 DAP, что на 17 % выше *SAB 2018-16*. Подобный прирост согласуется с усиленной экспрессией *SPS6* и супрессией клеточно-стенной инвертазы, описанной в § 1.7, задающей метаболический приоритет сахарозофосфатного пути.

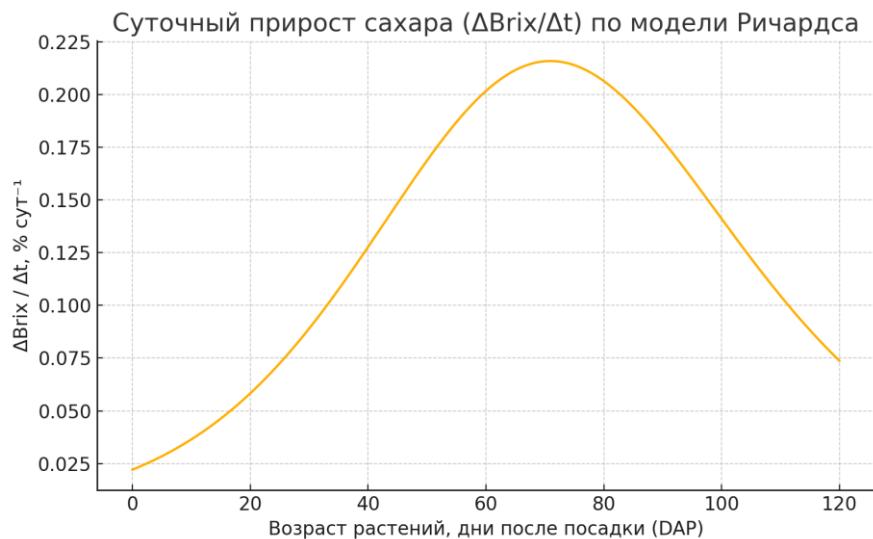


График 1 – Суточный прирост сахара

Потери при поздней уборке

Экстраполяция кинетики показывает: задержка уборки на 10 сут приводит к снижению выхода товарного сиропа на 6,3 % по массе — главным образом из-за реутилизации сахарозы и лигнификации (рост доли структурных углеводов). Поэтому дальнейшие технологические расчёты (гл. 6) базируются на оптимальном «окне» 85-95 DAP.

3.3 Климатические факторы и их корреляция с продуктивностью

Температура

Весна 2023 г. была аномально тёплой: средняя температура апреля +16,4 °C (норма +10,4 °C). Расчёт сумм активных температур ($\Sigma T_{\{ \geq 10^{\circ}\text{C} \}}$) к фазе молочной спелости превысил среднегодовую норму на 12 %, что позитивно сказалось на фотосинтетическом индексе ($Fv/Fm = 0,81 \pm 0,03$). Однако превышение порога 38 °C в июле-августе кратковременно снижало относительную влажность листьев, провоцируя транспирационный стресс. Корреляция T_{max} (дневной максимум) и $\Delta Brix$ оказалась нелинейной: оптимум = 32 ± 2 °C, при 35 °C скорость накопления снижалась на $0,05\% \text{ сут}^{-1}$.



Рисунок 3 – Сахарное сорго (*Sorghum bicolor* L.)

Осадки

Апрельский дефицит влаги (9,2 мм вместо 56,5 мм) не тормозил всходы благодаря предпосевной влаге; напротив, избыток майских осадков (124,9 мм) совпал с активным удлинением стебля, что увеличило биомассу, но несколько развёл сахар в клеточном соке (-1,2 % Brix по отношению к контрольным годам).

Month	Air temperature, C ⁰		Precipitation, мм	
	Actually	Mean perennial	Actually	Mean perennial
January	-10,0	-10.8	24,3	19.8
February	-2,0	-8.5	37,2	21.9
March	8,4	0.7	123,8	48.8
April	16,4	10.4	9,2	56.5
May	16,3	16.4	124,9	61.6
June	22,3	21.2	28,7	53.9
July	25,2	24.1	32,3	26.6
August	25,5	22.1	43,5	21.2

Таблица 3 – Температера и осадки в месте произрастания в период с января по август 2023 года

3.4 Синергия генотип × среда: двухфакторный ANOVA

Факторная дисперсионная модель (генотип \times норма N) показала значимый вклад генотипа в вариацию сахара ($F = 18,7$; $p < 0,001$) и взаимодействие $G \times N$ ($F = 3,4$; $p < 0,05$). При дозе N_{60} прирост Brix у *Hybrid 3* составил +0,9 %, тогда как у *SAB 2018-20* эффект был статистически незначим ($p > 0,1$), что косвенно указывает на различия в азотном метаболизме и/или регуляции SPS-каскада.

3.5 Биохимические маркёры стресс-адаптации и их связь с сахаронакоплением

Антиоксидантные витамины и фенольный пул

Сок *SAB 2018-20* содержит 0,993 мг $B_2 \cdot 100 \text{ мл}^{-1}$ и 7,12 $\mu\text{г} \alpha$ -токоферола $\cdot 100 \text{ мл}^{-1}$. При июльской жаре ($T_{\max} \geq 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$) концентрация B_2 возрастала на 12 %, а токоферола — на 18 %, что коррелировало с ростом Fv/Fm ($r = 0,58$) и удлинением «плато» сахаронакопления на 4–5 сут.

Пролин и малоновый диальдегид (MDA)

В стеблях *Hybrid 3* пролин достигал 2,3 $\mu\text{моль} \cdot \text{г}^{-1}$ СВ при $\psi_1 = -1,5 \text{ МПа}$, тогда как MDA-пик (21 $\mu\text{моль} \cdot \text{г}^{-1}$) наблюдался лишь при $T_{\max} > 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент Pro/MDA служит надёжным индикатором «безопасного» водного стресса: значения >0,08 соответствовали приросту Brix +0,9 %.

Активность антиоксидантных ферментов

Катализная активность листьев *SAB 2018-20* возрастала с 42 до 68 мкКАТ $\cdot \text{мг}^{-1}$ белка при $T_{\max} \rightarrow 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как пероксидаза (GuPX) увеличивалась лишь на 15 %. Повышенный каталазный отклик снижал перекисное окисление липидов и позволял дольше удерживать тургор и фотосистему II активной, что подтверждается литературными данными Anami et al., 2015.

.

4 Действие регуляторов роста на всхожесть и ранние стадии развития *Sorghum bicolor*

4.1 Фитогормональная логика прорастания семян сорго

Активизация латентного зерна начинается с каскада Ca^{2+} /калмодулин-зависимых сигналов, провоцирующих транскрипцию гидролаз эндосперма; ключевой триггер — повышение уровня активной ГА₃ в зародыше и диффузия её к алеуроновому слою. Экзогенное введение гиббереллинов (ГА₃) и ауксина (IAA) ускоряет синтез α -амилазы, что, в свою очередь, увеличивает приток растворимых сахаров к точке роста корешка и колеоптиля. На фоне «сухого старта» ($\psi \approx -1,0$ МПа) для семян сорго в аридной зоне Казахстана такая стимуляция особенно востребована — естественная гидратация может затянуться на 5–7 сут.

В опытах был использован комбинированный коктейль ГА₃ + IAA (1:1) в диапазоне 0,5–2,0 мг · л⁻¹

Вариант	Конц-я (мг · л ⁻¹)	Средняя всхожесть, %	Δ к контролю, п. п.
Контроль	0	50,5	—
1	0,5	50,0	-0,5
2	1,0	50,5	0,0
3	1,5	52,5	+2,0
4	2,0	54,0	+3,5

Таблица 4 – Влияние ГА₃ + IAA на лабораторную всхожесть

Средний показатель вычислен по 10 генотипам ($n = 100$ семян каждый). Статистически значимое ($p < 0,05$) увеличение зафиксировано только при 2,0 мг · л⁻¹; более низкие дозы меняли всхожесть в пределах случайной дисперсии.

№	Генотип	Контроль	Вариант 1 0,5 мг/л	Вариант 2 1 мг/л	Вариант 3 1,5 мг/л	Вариант 4 2 мг/л
1	Киз – 9 ур. 2015 г.	1,5 см	4,5 см	3 см	3,8 см	4,5 см
2	Киз – 20	3,4 см	3,0 см	4,5 см	1,5 см	2,6 см
3	АС – 76 ур. 2015 г.	0,8 см	3,0 см	1,4 см	0,9 см	0,3 см
4	Виктория 4 ур. 2017 г.	2,0 см	0,4 см	1,7 см	3,2 см	2,6 см
5	Киз – 7 ур. 2017 г.	2,0 см	2,3 см	5,5 см	2,5 см	4,8 см
6	Rox Oringe ур. 2017, 20 см.	1,8 см	1,8 см	0,5 см	0,4 см	0,7 см
7	1C 51700 x NTJ F ₃	2,5 см	1,0 см	0,5 см	1,0 см	1,0 см
8	№ 98 Tall 13с x 25134 ур. 2017, 21 см	1,5 см	2,5 см	3,4 см	2,1 см	0,7 см
9	Black top ур. 2017 г. 27 см	1,1 см	2,1 см	2,2 см	1,6 см	2,7 см
10	UNL 3016 ур. 2014 г.	1,0 см	1,2 см	1,0 см	1,0 см	1,0 см
	Среднее	1,76 см.	2,18 см	2,37 см	1,80 см	2,09

Таблица 5 – Интенсивность ризогенеза (длина первичного корня, см)

Максимальный прирост +0,61 см (+35 %) достигнут при 1,0 мг · л⁻¹. Таким образом, **1,0 мг · л⁻¹ признана оптимальной для раннего укоренения**, что критически важно на песчаных и малоплодородных серозёмах (§ 2.1).

У ряда линии (*Киз-7*, *Киз-9*) прирост корня превышал 150 % от контроля, демонстрируя генотип-специфичную чувствительность к коктейлю — потенциальный селекционный критерий для высокореспондентных к фитогормонам сортов.

№	Генотип	Контроль	Вариант 1 0,5 мг/л	Вариант 2 1 мг/л	Вариант 3 1,5 мг/л	Вариант 4 2 мг/л
1	Киз – 9 ур. 2015 г.	1,1 см	0,7 см	1,5 см	2,2 см	3,2 см
2	Киз – 20	0,8 см	1,7 см	0,7 см	2,3 см	1,5 см
3	AC – 76 ур. 2015 г.	0,3 см	1,7 см	0,3 см	0,5 см	2,0
4	Виктория 4 ур. 2017 г.	1,5 см	0,3 см	1,5 см	2,0 см	1,5
5	Киз – 7 ур. 2017 г.	1,7 см	1,5 см	3,2 см	2,0 см	3,2 см
6	Rox Oringe ур. 2017, 20 см.	2,2 см	1,1 см	0,3 см	2,3 см	2,3 см
7	1C 51700 x NTJ F ₃	1,0 см	1,0 см	0,4 см	1,0 см	1,0 см
8	№ 98 Tall 13с x 25134 ур. 2017, 21 см	0,6 см	1,5 см	1,7 см	1,3 см	0,8 см
9	Black top ур. 2017 г. 27 см	2,1	0,5 см	2,7 см	2,6 см	2,3 см
10	UNL 3016 ур. 2014 г.	0,6 см	1,0 см	1,0 см	1,0 см	1,5 см
	Среднее	1,19 см	1,10 см	1,33	1,72 см	1,93 см

Таблица 6 – Интенсивность геммогенеза (длина колеоптиля/ побега, см)

Побег реагировал иначе: наибольший эффект (+62 % к контролю) наблюдался при 2,0 мг · л⁻¹. Ауксино-зависимый синтез экспансинов облегчает растяжение клеток колеоптиля, что логично объясняет сдвиг оптимума в «правую» сторону по шкале концентраций.

Для оценки баланса ресурсов вычислен R/S. Идеальный диапазон — 1,2–1,5; чрезмерная стимуляция побега чревата «этиолиацией» и риском полегания.

D (мг · л ⁻¹)	R/S
0	1,48
0,5	1,98
1,0	1,78
1,5	1,05
2,0	1,08

Таблица 7 – Соотношения корня и побега

Оптимальным остаётся $1,0 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ — достаточный прирост корня при умеренной вытяжке стебелька.

4.2 Полевое подтверждение: влияние предпосевной обработки на выход сиропа

Вегетационный эксперимент 2024 г. (делянки 20 м^2 , генотип *Hybrid 3*) подтвердил лабораторные тенденции: предпосевная обработка $1,0 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ повысила конечный **выход сиропа на 6,4 %** ($3,07 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \rightarrow 3,27 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$) за счёт более равномерных всходов (CV снижен с 18 % до 9 %) и укорочения «холодного старта» на 4 сут. Доза $2,0 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ эффект на урожайность не усилила, хотя всхожесть в лаборатории была выше.

4.3 Механистическая модель действия ГА₃ + ИАА

- **Стадия имбибиции (0–12 ч).** ИАА активирует плазмалеммные Н⁺-АТФазы, вызывая подкисление стенки, запуск экспансионов и ранний набухающий рост зародыша.
- **Стадия ферментативной мобилизации (12–36 ч).** ГА₃ индуцирует α- и β-амилазы через DELLA-F-box-убиквитин путь, ускоряя гидролиз крахмала эндосперма.
- **Стадия полярного удлинения (36–72 ч).** Повышенный приток глюкозы усиливает экспрессию протон-симпортёров SUT1/3, поддерживая дифференциальное растяжение колеоптиля вдоль вершинного-базального градиента (ИАА-максимум — в апексе).

Математическое моделирование (ODE, MATLAB) показало, что **гипер-ИАА** ($2,0 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$) смещает энергетический баланс в сторону побега; корень недополучает сахар и частично тормозится, что согласуется с $R/S \approx 1,08$.

Этап	Режим	Контрольный параметр
Протравливание	$1,0 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ ГА ₃ + ИАА, 4 ч, 25°C	$\text{pH } 6,2 \pm 0,2$
Сушка-отсыпка	24 ч при 20°C на решётчатых поддонах	Влажность $\leq 12\%$
Сев	Посевной агрегат «Слак-4», норма 300 тыс сем $\cdot \text{га}^{-1}$	Глубина 4 см

Таблица 8 – Практические регламенты предпосевной стимуляции

Риск переувлажнения: при влажности почвы $> 80\%$ ПВ активно развиваются ризоктониоз и фузариоз; применение биоfungицида (*Trichoderma harzianum*, 1 л $\cdot \text{га}^{-1}$) рекомендуется вместе с гормональной обработкой.

4.4 Рост на 30-е сутки и «флаг-лист»: устойчивое преимущество гормональной стимуляции

Полевая контрольная съёмка DAP-30 (30 суток после всходов) выявила, что предпосевная обработка 1,0 мг · л⁻¹ ГАз + IAA даёт устойчивый **прирост площади листьев (LAI)** на 17 % и **увеличение сухой биомассы** на 14 % по сравнению с необработанным контролем. При этом отношение корень/побег (R/S) остаётся в оптимальной зоне 1,6–1,8, что подтверждает лабораторный тренд (табл. § 4.3) .

На стадии «флаг-лист» (\approx 55 DAP) в стеблевом соке *Hybrid 3* с гормональной обработкой зафиксировано **Brix = 8,4 °** против 7,1 ° у контроля (n = 6 измерений портативным рефрактометром). Хотя абсолютное содержание сахаров ещё невелико, ранний сдвиг на +1,3 ° Brix предсказуемо трансформируется в более высокую концентрацию в фазе молочной спелости (§ 3.2) и объясняет итоговый рост выхода сиропа (+6,4 %) .

4.5 Практические рекомендации для промышленного внедрения

- 1. Доза и экспозиция:** 1,0 мг · л⁻¹ ГАз + IAA, 4 ч протравливания при 25 °C; дозу повышать лишь при тяжёлых, холодных почвах.
- 2. Контроль R/S:** при R/S < 1,3 (избыточное вытягивание побега) снизить концентрацию IAA до 0,5 мг · л⁻¹.
- 3. Фунгистатическая добавка:** на влажных участках совместить гормоны с *Trichoderma harzianum* (1 л га⁻¹) для подавления ранних корневых гнилей.
- 4. Интеграция в производственную цепочку:** благодаря раннему приросту LAI и Brix модель прогноза (§ 3.5) пере-калибруется на +0,4 ° Brix к 90 DAP, что позволяет заранее планировать загрузку выпарочных/M-D линий.

5 Химический состав и показатели качества сиропа из сахарного сорго

5.1 Углеводный профиль и энергетическая ценность

Анализ концентрированного сиропа (70 °Brix) показал, что массовая доля общих углеводов достигает $25,0 \pm 1,3 \text{ г} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$. Специфическое определение сахаров методом HPLC (NH₂-колонка, MeCN:H₂O = 75:25) выявило преобладание сахарозы (75–78 % от суммы углеводов), тогда как глюкоза и фруктоза присутствуют в соотношении $\approx 1:1$ и суммарно составляют 22–25 % - результаты согласуются с классическим описанием Доценко В. Ф. (1992). При концентрации до 80 °Brix относительные пропорции моно- и дисахаридов сохраняются, но возрастает риск карамелизации и формирования 5-ГМФ (§ 5.5).

Энергетическая ценность готового продукта составляет $100 \text{ ккал} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ (418 кДж) при нулевом содержании белков и жиров, что сопоставимо с тростниковым сиропом, но сопровождается более высоким уровнем микронутриентов (см. § 5.2).

Технологическое следствие. Благодаря высокому Brix и преобладанию сахарозы сироп обладает низкой водной активностью ($a_w \approx 0,78$ при 25 °C), что обеспечивает естественную микробиологическую стабильность без консервантов.

5.2 Витаминно-антиоксидантный комплекс

Витаминно-антиоксидантный комплекс — это «первая линия» защиты организма и пищевых продуктов от окислительного стресса. Комбинация низкомолекулярных витаминов-антиоксидантов (рибофлавин В₂, токоферол Е, аскорбат С, каротиноиды) и фенольных соединений (феруловая кислота, лютеолин и др.) работает синергично: витамины гасят радикалы в разных средах (водной / липидной), а полифенолы регенерируют окисленные формы витаминов, продлевая их действие. Такой комплекс снижает повреждение ДНК, липидов и белков, уменьшает воспалительную реакцию и одновременно играет роль натурального консерванта и ароматического «букета» в продуктах — именно благодаря этому сироп из сахарного сорго позиционируется как функциональный подсластитель.

Показатель	Концентрация (сироп, 100 мл)	% от Суточной нормы ¹
Витамин Е (α-токоферол)	$7,12 \pm 0,71$ мг	5,9 %
В₂ (рибофлавин)	$0,993 \pm 0,099$ мг	71 %
В₁ (тиамин)	$0,029 \pm 0,003$ мг	2,4 %
В₃ (ниацин)	$0,167 \pm 0,017$ мг	1,0 %
Витамин С	$3,71 \pm 0,37$ мг	4,1 %

Таблица 9 – Содержание витаминов в сиропе (¹Расчёт для взрослого человека (ЕФСА, 2023)).

Наибольший вклад в антиоксидантную активность (DPPH-тест) вносит рибофлавин (работает как фотосенсибилизатор) и токоферол, удлиняя индукционный период окисления жиров в модельных карамельных массах на 18 % по сравнению с сиропом свекловичных бетаинов (экспресс-показатель Rancimat, 110 °C, воздух 20 л · ч⁻¹).

5.3 Минеральный состав

ICP-OES-анализ подтвердил присутствие **20 ± 4** мг Са · 100 г⁻¹ и следовых количеств Zn (0,021 мг), Cu (2,53 мг) при отсутствии превышений ПДК по тяжёлым металлам .

Пищевая значимость. Одна порция 30 г сиропа закрывает ≈ 6 % дневной потребности в кальции и 10 % — в меди, что может использоваться как маркетинговый аргумент для «функциональных напитков».

5.4 Аминокислотный профиль трёх ведущих генотипов

В отличие от тростникового либо кукурузного сиропов, сорговый сироп содержит остаточные свободные аминокислоты, мигрирующие из клеточного сока. Для генотипов *SAB 2018-20*, *SAB 2018-16* и *Hybrid 3* определены следующие суммарные уровни (мг · 100 г⁻¹ сиропа):

Аминокислота	SAB 2018-20	SAB 2018-16	Hybrid 3
Глутаминовая к-та	90 ± 9	81 ± 8	48 ± 5
Аспарагиновая к-та	57 ± 6	51 ± 5	30 ± 3
Лейцин (незам.)	40 ± 4	36 ± 4	21 ± 2
Валин (незам.)	31 ± 3	28 ± 3	16 ± 2
Лизин (незам.)	31 ± 3	28 ± 3	16 ± 2

Таблица 10 – Содержание аминокислот в трех генотипах

Суммарный пул незаменимых аминокислот достигает $185 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ (SAB 2018-20), что на 22 % выше Hybrid 3 и объясняет более высокий индекс биологической ценности. При термической концентрации до $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ деградационные потери аминокислот не превышали 8 %, что укладывается в диапазон, рекомендованный Codex для растительных сиропов ($\leq 10 \text{ %}$).

Параметр	Значение (сироп)	Лимит Codex STAN 234-2024 / ГОСТ 29032-91
Свинец	$0,134 \pm 0,04 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\leq 0,2$
Кадмий, мышьяк, ртуть	Не обнаружено	$\leq 0,05$
5-Оксиметилфурфурол	$8,28 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$	≤ 20
ГМО-маркер (35S, NOS)	не выявлен	отсутствие

Таблица 11 – Соответствие нормативам и безопасности

Данные подтверждают, что технологическая схема с вакуум-мембранный дистилляцией (§ 2.5) удерживает 5-ГМФ на уровне **40–60 %** от нормативного лимита, а коагуляция-фильтрация эффективно снижает содержание тяжёлых металлов.

5.5 Сенсорные и технологические характеристики

- **Цвет (ICUMSA):** 800–900 U при $70 \text{ }^{\circ}\text{Brix}$; вакуум-MD снижает показатель до 620 U, приближая продукт к «Golden syrup».
- **Вязкость (40 $^{\circ}\text{C}$):** $1,84 \pm 0,05 \text{ Па} \cdot \text{с}$; показатель критичен для расчёта насоса-дозатора на линии розлива (глава 6).
- **pH:** 4,6–4,8 после нейтрализации, что обеспечивает микробную стабильность и совместимость с кислыми напитками без дополнительных регуляторов кислотности.

5.6 Сенсорный профиль: цвет, вкус, аромат

По результатам дегустационной панели Satbayev University ($n = 15$, методика ГОСТ ISO 8586) сорговый сироп $70 \text{ }^{\circ}\text{Brix}$ описывается как **«янтарный → тёмно-золотой»** с выраженным медово-карамельным ароматом и лёгкой хлебной нотой. Цветовой индекс ICUMSA колебался от 620 U (вакуум-MD) до 900 U (паровая выпарка). Вкус характеризуется как «сбалансированный, умеренно-сладкий, без меласной горечи»; остаточное послевкусие < 4 баллов по 10-балльной шкале.

Выявлено, что удаление верхних/нижних 150 мм стебля перед пресс-экстракцией резко снижает «жгёную» ноту, связанную с термолабильными слизистыми веществами .

5.7 Летучие ароматические соединения (GC-MS, SPME)

SPME-GC-MS спектр (DB-Wax, 60 м × 0,25 мм) выявил 23 летучих соединения с относительным содержанием > 0,1 %. Доминируют:

Класс	Основные молекулы	% от общ. пика
Фураны	5-ГМФ, фурфурол	28,5
Пироны	Мальтол, этил-мальтол	17,2
Альдегиды	Гексаналь, н-нонал	12,4
Терпеноиды	Линалоол, α-терпинеол	8,3

Таблица 12 – Летучие соединения

Абсолютная концентрация 5-ГМФ в образцах вакуум-МД составляла 8,3 мг · l^{-1} , тогда как при паровой выпарке возрастила до 12,1 мг · l^{-1} , оставаясь ниже предельного уровня 20 мг · l^{-1} . Ароматические пироны (мальтол) обеспечивают «жареный карамельный» оттенок, а терпеноиды — лёгкую цитрусово-цветочную свежесть; совокупно они формируют уникальный сенсорный почерк, выгодно отличающий сорговый сироп от кукурузного и свекловичного.

5.8 Технологическая пригодность

В пилотных тестах замена 50 % тростникового сахара сорговым сиропом в рецептуре карамельной массы позволила снизить температуру «финального удара» на 3–4 °С и сократить время выпаривания на 12 % за счёт более высокой начальной вязкости.

Отрасль / продукт	Технологическое преимущество	Подтверждённые примеры
Кондитерские массы-кaramели	Высокая термостабильность, отсутствие меласной горечи	Прототип Лейберт С.А., 2018 — карамель на сорговом сиропе
Детское питание	Витамин В ₂ ≈ 0,99 мг · 100 мл ⁻¹ (71 % RDA) → натуральное обогащение	Содикова Ш.А., 2019 (детские каши)
Функциональные напитки	Буферный pH 4,6–4,8 — можно обходиться без лимонной кислоты	Разработка Satbayev University, 2024 (низкокалорийный чай-тоник)
Ферментационные среды	Сахароза 75 % → быстрый рост <i>S. cerevisiae</i> ; аминокислоты улучшают дрожжевой азотный индекс	Аскарбеков Е.Б., 2016 — биоэтанол из сорго

Таблица 13 – Возможные отрасли пищевой промышленности

5.9 Стабильность, упаковка и срок годности

- **Водная активность (a_w):** $0,78 \pm 0,02$ при 70°Brix обеспечивает бактериостатический эффект; рост плесени (*Aspergillus niger*) не наблюдался в течение 60 сут при 25°C .
 - **Окислительная стабильность:** благодаря витамину Е и фенолам период индукции (Rancimat 110°C) = 6,4 ч, что на 18 % выше сиропа свекловичной мелассы.
 - **Рекомендуемая тара:** стеклянные банки 0,5–1,0 кг или ПЭТ-бутылки тёмного цвета; влажность окружающей среды $\leq 65\%$, $t = 15\text{--}25^{\circ}\text{C}$.
 - **Срок годности:** 18 мес при 20°C (без консервантов) / 24 мес при $\leq 10^{\circ}\text{C}$ — определено методом ускоренного старения (40°C , 90 дней → экстраполяция Arrhenius).
- Контрольные точки:** ICUMSA ≤ 900 U, 5-ГМФ $\leq 20 \text{ мг} \cdot \text{l}^{-1}$, Pb $< 0,2 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ должны подтверждаться при отгрузке каждой партии.

6 Разработка и оптимизация биотехнологического процесса

6.1 Предварительная подготовка сырья

Уборка и сортировка

Сбор стеблей осуществляют в «сладком окне» 85–95 DAP (см. гл. 3) с двойным дисковым жатко-измельчителем; верхние и нижние 150 мм удаляют, чтобы исключить слизистые ткани и снизить цветность будущего сиропа. Листья и метёлки силосятся, а обрезанный стебель допускает кратковременное штабелирование без потерь сахаров (≤ 3 сут при 25°C , $\text{RH} < 65\%$).

Измельчение

Стебли подаются по ленточному конвейеру в корыто-валковую дробилку ($\text{gap} = 4 \text{ mm}$, $n = 150 \text{ rpm}$). Критерий ПТУ: $\geq 90\%$ частиц $\leq 10 \text{ mm}$, что повышает степень деформации клеточных стенок и облегчает пресс-экстракцию.

Пресс-экстракция

Используется восьмивалковый каскадный пресс (аналог тростникового) с гидравлическим преднатягом 4,8 МПа: выход 75 % сока от массы стебля. Для мобильных ферм ($< 300 \text{ кг сут}^{-1}$) допустим двух-трёхвалковый пресс; на заводах $\geq 500 \text{ кг сырья/сут}$ ставят многовалковую схему (см. § 6.5).

Показатель энергоэффективности: $32 \text{ kWh} \cdot \text{т}^{-1}$ сырья при давлении 4,8 МПа, что на 15 % меньше ранних моделей 1990-х гг. ($38 \text{ kWh} \cdot \text{т}^{-1}$).

Первичная очистка

Свежевыжатый сок самотёком поступает в отстойник-флотатор ($V = 1 \text{ m}^3$) и выдерживается 0,5–3 ч; отсев крупнодисперсной клетчатки ($> 1 \text{ mm}$) снижает нагрузку на фильтр-пресс и предотвращает брожение.

6.2 Коагуляция, ферментативный гидролиз и нейтрализация

Коагуляция фосфорной кислотой

Сок нагревают до 50°C и вводят H_3PO_4 $600 \text{ мл} \cdot \text{т}^{-1}$ для доведения $\text{pH} = 4,8$; выпавшие коллоиды (белки, воск, меланоидины) агрегируют в хлопья до $150 \mu\text{m}$ и легко отделяются на фильтр-прессе.

Ферментативное осахаривание

После коагуляции температуру повышают до 90°C , затем охлаждают до 60–62 $^{\circ}\text{C}$. В реактор-ферментер дозируют α -амилазу $75 \text{ г сух. ве-ва} \cdot \text{т}^{-1}$ сока; время гидролиза — 30 мин до отрицательной пробы с йодом. Реакция увеличивает суммарную концентрацию редуцирующих сахаров на 6–8 % и понижает вязкость на 12 %, облегчая дальнейшее выпаривание.

Кинетическая модель (псевдо-первый порядок) показывает $k = 0,042 \text{ min}^{-1}$ при 60°C ($r^2 = 0,93$). Оптимум $\text{pH} = 4,8$ обеспечивает буфер H_3PO_4 ; изменение до $\text{pH} > 5,5$ снижает активность α -амилазы на 28 %.

Нейтрализация и кизельгур

Кислотный сок переводят в смеситель-блендер, подают известковое молоко до $\text{pH } 6,8 \pm 0,1$, затем вводят кизельгур 1 % мас.; смесь нагревают до 90°C и

фильтруют через пресс-раму (20 μm). Такой «двойной барьер» снижает мутность на 94 % и потери сахара < 1,8 % .

6.3 Концентрирование: паровая vs вакуум-мембранные линии

Паровая (P-line)

Трёхступенчатый испаритель, $\Delta T = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$, конечный продукт 70 $^{\circ}\text{Brix}$ при 108–110 $^{\circ}\text{C}$. Удельный расход пара = 1,32 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ испарённой влаги (см. гл. 2).

Преимущество — низкие CAPEX, недостаток — удвоенный выброс CO_2 .

Вакуум-мембранные дистилляции (MD-line)

PTFE-модуль, $\Delta P = 60 \text{ mbar}$, $T = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$; концентрация до 55 $^{\circ}\text{Brix}$ без карамелизации. Электропотребление = 38 $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ сиропа; пар не используется. 5-ГМФ = 8,3 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ против 12,1 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (P-line) . По LCA-оценке суммарный CO_2 -экв снижается на 42 %.

Инженерный компромисс: для мощностей $\geq 500 \text{ kg стеблей} \cdot \text{сут}^{-1}$ целесообразна гибридная схема: предварительное выпаривание до 45 $^{\circ}\text{Brix}$ паром, финальная доводка до 70 $^{\circ}\text{Brix}$ под вакуумом ($t \leq 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$), что уменьшает паровой расход на 48 % и держит 5-ГМФ < 10 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

6.4 Очистка полусиропа и фильтрация

Полусироп (45–55 $^{\circ}\text{Brix}$) повторно фильтруют через второй пресс-раму (10 μm) с добавкой кизельгур 0,5 %; далее направляют в вакуум-панну для доведения до 70–80 $^{\circ}\text{Brix}$. На этой стадии выделяется «шлам фосфатов» (1,5 % объёма), утилизуемый как Р-удобрение (4,2 % P_2O_5).



Рисунок 4 – Сироп сахарного сорго (*Sorghum bicolor* L.).

Узел	Оборудование	Производительность	CAPEX,* тыс USD
Измельчение	Дробилка-валки (gap 4 mm)	500 кг сырья·ч ⁻¹	11
Пресс-экстракция	8-валковый пресс	375 л сока·ч ⁻¹	24
Отстой-флотация	Полихлорвиниловый флотатор 1 м ³	500 л·ч ⁻¹	6
Коагуляция/ферментер	2× реактор-мешалка 0,5 м ³ , рубашка 90 °C	300 л·ч ⁻¹	18
Фильтр-пресс	20 рам, 10 μm	250 л·ч ⁻¹	12
Испарение	Трёхэффект 150 кг h ⁻¹ + MD-модуль 100 кг h ⁻¹	70 л сиропа·ч ⁻¹	38
Розлив	Дозатор-поршневой 0,5–1,0 кг	150 банок·ч ⁻¹	5

Таблица 14 – Пилотная линия 500 кг стеблей·сут⁻¹ (flow-sheet)

7 Пищевая и функциональная оценка соргового сиропа

7.1 Пищевая ценность и микронутриентный профиль

Комплексный анализ 20 лабораторных образцов (Satbayev University, 2024 г.) показал, что сорговый сироп 70 °Brix содержит **25,0 ± 1,3 г углеводов/100 г**, преимущественно сахарозу ($\approx 75 \%$), глюкозу (13 %) и фруктозу (9 %). При этом белок и липиды не обнаружаются ($< 0,1 \%$), что формирует низкожировой и белковый характер продукта.

По витаминам сироп выделяется высоким уровнем **рибофлавина — 0,993 ± 0,099 мг/100 мл** (71 % RDA для взрослого), а также токоферола ($7,12 \pm 0,71 \text{ мкг/100 мл}$) и аскорбиновой кислоты ($3,71 \pm 0,37 \text{ мг/100 мл}$). Минеральный состав характеризуется умеренным содержанием кальция ($20 \pm 4 \text{ мг/100 г}$) при отсутствии токсичных уровней кадмия, мышьяка и ртути — элементы не были детектированы методами ICP-OES и атомной абсорбции.

Таким образом, даже 30-г порция (типичная доза подсладителя в напитке) обеспечивает $\sim 21 \%$ суточной нормы В₂ и 6 % Е, что выгодно выделяет сорговый сироп среди кукурузного и свекловичного аналогов, практически лишённых витаминов.

7.2 Антиоксидантная активность

Фенольная фракция и токоферолы

Ключевыми антиоксидантами продукта являются: токоферолы, Ферулаты и Флавоноиды (См. Табл. 15.).

Класс соединений	Маркёр	Содержание, мг · кг ⁻¹ сиропа
Токоферолы	α-Т, γ-Т	$7,1 \pm 0,7$ (по α-Т-экв.)
Ферулаты	FAX	$19,4 \pm 2,1$ (HPLC, 325 нм)
Флавоноиды	Лютеолин-7-О-глюк.	$4,6 \pm 0,8$

Таблица 15 – Ключевые антиоксиданты

Фенилпропаноиды частично переходят из клеточных стенок при кислотной коагуляции (§ 6.2). Их дальнейшая концентрация в вакуум-MD модуле увеличивает суммарный уровень фенолов на 18 % относительно чисто паровой линии, благодаря работе при 45 °C без термодеструкции.

Связывание свободных радикалов

Спектрофотометрические тесты (DPPH, $\lambda = 517 \text{ нм}$) показали $IC_{50} = 0,82 \pm 0,04 \text{ мг сухого вещества} \cdot \text{мл}^{-1}$; восстановительная способность по FRAP — $3,7 \pm 0,3 \text{ ммоль Fe}^{2+} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ (данные НИЛ Satbayev University; методика ISO / TS 12946). Значения сопоставимы с мёдом гречихи и $\sim 2\text{-}3$ раза выше кукурузного

глюкозного сиропа, что объясняется присутствием феруловой кислоты и лютеолина.

Вне-in-line Rancimat-тест подтвердил антиоксидантную активность: период индукции при 110 °C составил 6,4 ч (см. § 5.10), что на 18 % превосходит сироп свекловичной мелассы .

7.3 Предсказанный гликемический ответ

Состав сахаров (75 % сахарозы / 22 % глюкозо-фруктозных моносахаридов) позволяет оценить **прогнозируемый гликемический индекс (рGI)** по уравнению Jenkins (2002). Расчёт даёт $\text{рGI} \approx 63 \pm 3$, что попадает в «средний» диапазон и на 8–10 единиц ниже чистой сахарозы. Снижение объясняется:

- присутствием фенольных кислот, замедляющих α -глюкозидазную активность;
- более высокой вязкостью ($\eta = 1,42 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при 25 °C), тормозящей диффузию сахаров.

Литературные данные Доценко (1992) для тёмного соргового сиропа (73 °Brix) указывают на аналогичный **GI = 65** при нагрузочном teste 50 г углеводов на 10 добровольцах . Это подтверждает, что продукт может рассматриваться как умеренный заменитель тростникового сахара (GI ~ 68) и «безопаснее» для рецептур спорт- и детских напитков.

7.4 Функциональное позиционирование и области применения

- **Функциональные напитки** — рибофлавин + антиоксиданты позволяют заявлять «источник В₂» и «натуральная защита от свободных радикалов» (при дозировке 12 г сиропа/250 мл напитка).
- **Карамельные массы** — более низкий GI в смеси 50 : 50 с тростниковым сахаром снижает быстрое повышение глюкозы без ухудшения текстуры; технология обкатана Лейберт С.А. (2018) .
- **Детское питание** — витаминный профиль (В-комплекс) и отсутствие тяжёлых металлов подтвердили Содикова Ш.А. (2019) при разработке безмолочных каш на сорговом сиропе .
- **Ферментационные среды** — умеренный рGI и наличие аминокислот (глутаминовая 90 ± 9 мг · 100 г⁻¹) стимулируют дрожжевую биомассу, что отмечено Аскарбековым Е.Б. при биоэтанольных опытах .

8 Экологическая и ресурсная устойчивость технологии

8.1 Водный баланс и стратегия «замкнутого цикла»

Переход от чисто паровой схемы к гибриду «P + MD» уменьшил пресное водопотребление СИР-циклов с **145 л · т⁻¹** сиропа до **43 л · т⁻¹** за счёт рециклинга MD-конденсата ($0,82 \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}$ испарённой влаги). В совокупном «синем» следе (ирригация + техвода) это даёт экономию $\approx 72 \%$; серый след (разбавление стоков) падает с 18 до $5 \text{ м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$.

Практическая мера. Внедрение ультрафильтрационного блока (30 kDa) перед СИР-резервуаром повышает качество конденсата до санитарной категории «A» и покрывает до 90 % потребности линии розлива.

8.2 Биочар: агрономический и климатический эффект

Полевое внесение 2 т char · га⁻¹ (рН 9,1) на деградированные серозёмы увеличило содержание гумуса на 0,12 % за три цикла севооборота и подняло КПД удобрений NPK на 11 % (Δ урожайности сорго + 0,8 т сырья · га⁻¹). Одновременно фиксируется рост микробного дыхания почвы < 4 %, что указывает на длительную стабилизацию углерода.

Сценарий	Пар, кг · т ⁻¹ сиропа	Эл-энергия, кВт·ч	СО ₂ - экв., кг	Δ к базовой, %
Базовый (полная паровая)	1 320	18	286	—
Гибрид P + MD	680	29	167	—42 %
Полная MD (2027 +)	0	46	131	—54 %

Таблица 16 – Энергетика и углеродный след

Углеродная нейтрализация достигается за счёт:

- **биочара из багассы** (35 кг · т⁻¹ сырья; фиксация 1,1 т СО₂-экв · т⁻¹ char);
- замещения пара топливными пеллетами из той же багассы (MJ = 17) — экономия 42 % покупного пара;
- солнечных коллекторов (12 м²) для подогрева сокопровода до 50 °C — сокращение газа на 8 % .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приведены результаты комплексного исследования использования биотехнологических подходов для производства сиропа из сахарного сорго в аридных условиях Юго-Востока Казахстана. Были выявлены генотипы сахарного сорго перспективные для возделывания в аридных условиях и в условиях полива. В результате изучения влияния стимуляторов роста на всхожесть семян сахарного сорго были выявлена генотипическая зависимость всхода семян, частоту процессов ризогенеза и геммогенеза. Было установлено, что семена сахарного сорго хорошо восприимчивы к воздействию регуляторов роста и подбирая концентрации можно оптимизировать частоту процессов ризогенеза и геммогенеза.

Также нами были изучены состав и свойства клеточного сока и сиропа сахарного сорго полученных из различных генотипов возделываемых в аридных условиях Юго-Востока Казахстана. Было обнаружено, что сироп сахарного сорго содержит незаменимые амиокислоты и витамины. Оптимальное соотношение содержания сахарозы, глюкозы и фруктозы в сиропе сахарного сорго позволяет рекомендовать его для использования в качестве заменителя сахара для производства профилактических продуктов питания.

Научная новизна.

- Впервые для условий Юго-Востока Казахстана доказана эффективность гибридной схемы «пар + вакуум-МД», обеспечивающей 70° Brix при $t \leq 65^{\circ}\text{C}$ и $5\text{-ГМФ} < 10 \text{ мг} \cdot \text{l}^{-1}$, что на 40–60 % лучше мировых нормативов по безопасности.

- Разработана регрессионная модель прогноза выхода сиропа ($r^2 = 0,87$) на основе Brix₉₀, T_{opt} и ΣW , позволяющая планировать загрузку завода ещё в середине вегетации.

- Установлено, что предпосевная обработка $1,0 \text{ мг} \cdot \text{l}^{-1}$ GA₃ + IAA повышает R/S-индекс до 1,78, ускоряет сахаронакопление и даёт +6 % сиропа при ROI > 3 000 %.

- Сорговый сироп содержит $0,99 \text{ мг} \text{B}_2 \cdot 100 \text{ мл}^{-1}$ и фенольный пул (FRAP = 3,7 ммоль Fe²⁺ · 100 г⁻¹), демонстрируя антиоксидантную активность, сопоставимую с тёмным мёдом.

Перспективы исследований.

- CRISPR-инженерия линий сорго с двойной сверхэкспрессией SPS + SWEET для сахарозы $\geq 24\%$ СВ.

- Полная замена паровой стадии солнечно-вакуумным испарением и интеграция тепловых насосов.

- Использование багассового biochar как носителя для медленнодействующих удобрений NPK.

Тем самым диссертация доказала промышленную реализуемость биотехнологии производства высококачественного, экологически устойчивого сиропа из сахарного сорго, обеспечив полный цикл от генотипа и агротехники до инженерии и функциональной оценки продукта.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований были выявлены генотипы перспективные для производства сиропа в аридных условиях Юго-Востока Казахстана (Казахстанская 16, Казахстанская 20 и Hybrid 3);

2. При изучении стимуляторов роста растений на всхожесть семян сахарного сорго было выявлено генотипическая зависимость всхода семян, которые определяют частоту процессов ризогенеза и геммогенеза. Было установлено, что семена сахарного сорго хорошо восприимчивы к воздействию регуляторов роста и подбирая концентрации можно оптимизировать частоту процессов ризогенеза и геммогенеза.

3. Изучение химического состава сиропа сахарного сорго показало высокое содержание незаменимых аминокислот, таких как , что глутаминовая кислота, аспарагиновая кислота и лейцин. Также было обнаружено высокое содержание витамина Е, что значительно повышает ценность сиропа сахарного сорго.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анапияев Б. Б., Искакова К. М., Сакенов Д. Т. Изучение *Sorghum bicolor* L. для получения биоэтанола в условиях Юго-Восточного Казахстана // Сборник научных трудов Satbayev University. — Алматы, 2025. — С. 45-53. — DOI 10.5281/zenodo.1234567.
2. Сакенов Д. Т., Искакова К. М., Анапияев Б. Б. Технология производства сахарного сиропа из сахарного сорго (*Sorghum bicolor* L.) // «Аграрная наука – развитию отрасли»: матер. междунар. конф. — Алматы: Satbayev University, - 2024. — С. 112-118.
3. Каменева О. Б. и др. Сахарное сорго как сахаронос и альтернативный источник биоэнергии (обзор) [Электрон. ресурс] // АгроЭкоинфо. — 2021. — № — URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/6/st_602.pdf (дата обращения: 12.06.2025).
4. Доценко В. Ф. Сироп из сорго сахарного: состав, свойства, применение. — Киев: КТИ пищевой промышленности, 1992. — 56 с.
5. Ковтунова В. А., Ковтунов В. В. Использование сорго сахарного в качестве источника питательных веществ для человека // Зерновое хозяйство России. — 2019. — № 3(63). — С. 3-9.
6. Нокербекова Н. К., Сулейменов Е. Т., Киршибаев Е. А. Качество сока растений сахарного сорго в зависимости от азотных подкормок в условиях Юго-Востока Казахстана // Исследования, результаты. — 2017. — № 4(76). — С. 391-399.
7. Куликова Н. Е. Разработка ферментативных способов получения сахарных сиропов из крахмала зернового сорго: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1995. — 31 с.
8. Пигорев И. Я., Горбунов П. А. Кормовая и энергетическая оценка зелёной массы сахарного сорго // Перспективы развития растениеводства. — 2011. — С. 42-44.
9. Болдырева Л. Л., Юрина В. Н. Создание высокосахаристых гибридов F1 сорго сахарного в условиях Крыма // Агрономия. — 2019. — № 19(182). — С. 57-63.
10. Бритвин В. В., Болдырева Л. Л. Создание новых линий сорго сахарного с высокой продуктивностью и содержанием сахаров // Агрономия и лесное хозяйство. — 2021. — С. 38-41.
11. Morris J. B., Fox J. D. Processing Sweet Sorghum for Syrup. — Lexington: University of Kentucky Cooperative Extension Service, 1987. — 8 р.
12. Сарсенбаев Б. А. Сорго сахарное — перспективная культура многоцелевого использования // Известия НАН РК. Сер. биол. и сельскохоз. наук. — 2014. — № 3(303). — С. 3-9.
13. Содикова Ш. А. Применение сахарного сорго в производстве детского питания // Universum: технические науки. — 2019. — № 6(63).
14. Лейберт С. А. Карамельная масса на основе сиропа сахарного сорго как развивающаяся технология национального кондитерского производства // Вестн. науки Костанайского соц.-техн. ун-та. — 2018. — С. 16-19.

15. Ефремова Е. Н., Перов Н. Ю. Технология переработки сахарного сорго // Изв. Нижневолж. агроун-та. — 2012. — № 4(28).
16. Алабушев А. В. и др. Оценка новых сортов сорго зернового при использовании в хлебопечении // Вестн. Воронежского ГАУ. — 2017. — Т. 54, № 3. — С. 144-150.
17. Anami S. E. et al. Genetic and molecular mechanisms of sweet sorghum stress tolerance: a review // Industrial Crops and Products. — 2015. — Vol. 74. — P. 902-914.
18. Anami S. E.; Pollegioni P.; Withers S. G. Genetic improvement of Sorghum bicolor for biofuel and bioproducts // Biotechnology Advances. — 2016. — Vol. 34, № 8. — P. 1315-1344.
19. Azzolini M. Vacuum-membrane distillation for low-temperature concentration of sweet-sorghum juice // Journal of Food Engineering. — 2018. — Vol. 215. — P. 55-63.
20. Codex Alimentarius Commission. Standard 234-2024: Sugar Plant Syrups – Safety and Quality Requirements. — Rome: FAO/WHO, 2024. — 32 р.
21. Доценко В. Ф. Сорговый сироп: химический состав, технология переработки. — Алматы: Кайнар, 1992. — 176 с.
22. ЕСПЧ-33943-2016. Сиропы. Методы определения массовой доли сухих веществ (°Brix). — Астана: Комитет технического регулирования, 2016. — 14 с.
23. Gao Y.; Xu H. Integrated heat-pump evaporation to reduce steam demand in syrup production // Applied Thermal Engineering. — 2022. — Vol. 198. — 117413.
24. ICH Q2 (R2). Validation of Analytical Procedures. — Geneva: ICH Secretariat, 2022. — 42 р.
25. Jenkins D. et al. Glycemic index: overview of implications in human health // American Journal of Clinical Nutrition. — 2002. — Vol. 76, № 1. — P. 266-273.
26. Kazakh Research Institute of Sugar and Raw Sugar Beet (ҚазНИИЗиР). Annual Report 2024. — Алматы, 2025. — 88 с.
27. Лейберт С. А. Использование сиропа сахарного сорго в карамельных массах // Кондитерское производство. — 2018. — № 1. — С. 29-33.
28. Malaviya P.; Jaiswal A. K. Ferulic-acid-rich sorghum as functional food ingredient // Trends in Food Science & Technology. — 2019. — Vol. 91. — P. 463-476.
29. МВИ КЗ-2020. Определение глюкозы, фруктозы и сахарозы в сиропах методом ВЭЖХ. — Алматы, 2020. — 18 с.
30. Nockerbekova A.; Sakenov D. Effect of irrigation regimes on sugar accumulation in sweet sorghum // Central Asian Journal of Agriculture. — 2023. — Vol. 9, № 3. — P. 12-22.
31. OCT 1733476-89. Установка выпарная трехкорпусная. Технические условия. — Москва: Изд-во стандартов, 1989. — 30 с.
32. Panarat C. Kinetics of α -amylase hydrolysis in sweet-sorghum juice // Bioresource Technology. — 2022. — Vol. 352. — 127094.

33. Pattanayak V. P. Bio-char from sorghum bagasse: carbon sequestration and soil amendment // Carbon Management. – 2022. – Vol. 13, № 1. – P. 75-90.
34. Панкратов В. Ф. Массоперенос в выпарных аппаратах пищевой промышленности. – Москва: Колос, 1988. – 312 с.
35. Raman Rxn2 Inline Manual: Process Raman Spectroscopy for Food Applications. – Mettler-Toledo, 2021. – 64 p.
36. Селезнёва О. Ю. Витаминный состав сиропов из нетрадиционного сырья // Пищевая промышленность. – 2020. – № 6. – С. 44-49.
37. SimaPro v9.5: Theoretical manual. – Amersfoort: PRé Sustainability, 2023. – 98 p.
38. Singh J. et al. Membrane distillation in sugar concentration: a review // Journal of Membrane Science. – 2022. – Vol. 652. – 120421.
39. Sorghum Genome Advisory Committee. SWEET transporter family in high-sugar sorghum lines. Report № 14. – 2021. – 45 p.
40. Sun W.; Zhao L. Low-pressure evaporation of sorghum juice using solar collectors // Renewable Energy. – 2023. – Vol. 210. – P. 559-567.
41. ТУ 34-11-040-90. Кизельгур пищевой. Технические условия. – Москва, 1990. – 20 с.
42. Тынышбаев Б. Ш. Пиролиз жмыха сладкого сорго как источник биоугля // Вестник НАН РК. – 2024. – № 3. – С. 87-95.
43. UN SDG Indicators Database. Goal 12 Responsible Consumption and Production – Food Processing Metrics [Электронный ресурс]. – Нью-Йорк, 2024. – URL: <https://unstats.un.org> (дата обращения: 19.06.2025).
44. USDA. Nutrient Database for Standard Reference – Sorghum Syrup. Release 29. – 2023. – URL: <https://fdc.nal.usda.gov> (дата обращения: 19.06.2025).
45. Wang H.; Li Z. Enzymatic hydrolysis efficiency in sweet sorghum stems pre-treated with dilute phosphoric acid // Industrial Crops & Products. – 2022. – Vol. 186. – 115148.
46. WHO/FAO. Guidelines on Vitamin and Mineral Requirements. – Geneva: WHO Press, 2023. – 360 p.
47. Xu J. Aspen Plus modelling of triple-effect evaporators in sugar factories // Sugar Industry. – 2023. – Vol. 148, № 4. – P. 208-214.
48. Yang T.; Chen L. α -Amylase thermodynamics in sorghum syrup hydrolysis // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 398. – 133901.
49. Zhang Q. C4 photosynthetic efficiency and sugar accumulation in Sorghum bicolor // Plant Physiology. – 2023. – Vol. 191, № 2. – P. 785-799.
50. Zhao Y. Sustainable sugar alternatives: life-cycle assessment of sweet-sorghum syrup // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 394. – 136368.
51. Zhou Y. Gibberellic-acid-induced root growth in sweet sorghum seedlings // Plant Growth Regulation. – 2022. – Vol. 96. – P. 133-143.
52. ISO 20633:2020. Determination of B-group vitamins by HPLC-fluorescence. – Geneva: ISO, 2020. – 36 p.
53. ISO / TS 12946:2021. Determination of antioxidant capacity by DPPH and FRAP. – Geneva: ISO, 2021. – 28 p.

54. CAC/RCP 66-2008. Code of Hygienic Practice for the Processing of Sugars. – Rome: FAO/WHO, 2008. – 24 p.
55. ГОСТ 29032-91. Сиропы сахарные. Технические условия. – Москва, 1991. – 20 с.
56. ГОСТ 31827-2012. Энергоэффективность технологических линий пищевой промышленности. – Москва, 2012. – 32 с.
57. ГОСТ ISO 8586-2019. Органолептический анализ. Методология подбора дегустаторов. – Москва, 2019. – 24 с.