

УДК 663.5

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ЗЕРНОВЫХ ДИСТИЛЛИЯТОВ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

© Н.В. Шелехова

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой
биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра
питания, биотехнологии и безопасности пищи, ул. Самокатная, 4б,
Москва, 111033, Россия, 4953610101@mail.ru

Введение. Российский виски появился сравнительно недавно, однако у отечественного напитка просматриваются весьма неплохие перспективы. В целях успешной реализации политики импортозамещения важно обеспечить выпуск конкурентоспособной алкогольной продукции российского производства. Знание химического состава зерновых дистиллятов и влияния каждого этапа производства на образование химических соединений обеспечат основу для решения проблем, связанных с производством высококачественных спиртных напитков.

Цель исследования: с применением комплекса современных методов анализа получить новые данные о химическом составе российских зерновых дистиллятов.

Объекты и методы исследования. Зерновой дистиллят российского производства и модельные растворы, приготовленные на его основе. Ионный состав определяли методом капиллярного электрофореза, состав летучих органических примесей – методом газовой хроматографии, состав фенольных и фурановых соединений – методом высокоеффективной жидкостной хроматографии, оценку запаха проводили с использованием электронной сенсорной системы и дегустационного метода.

Результаты и их обсуждение. Установлен компонентный состав выдержаных и невыдержаных дистиллятов российского производства. Определены суммарные концентрации идентифицированных ионов: для образца D_1 – 7.86 мг/дм³, для D_2 – 15.91 мг/дм³, для D_3 – 12.85 мг/дм³, для D_4 – 49.85 мг/дм³. Установлено, что максимальная суммарная массовая концентрация идентифицированных летучих органических примесей 792.86 мг/дм³ обнаружена в модельном растворе D_2 . Суммарная массовая концентрация идентифицированных фенольных и фурановых соединений для модельного раствора D_2 составила 6.10 мг/дм³, для D_3 – 6.70 мг/дм³, для D_4 – 23.63 мг/дм³. Сравнительный анализ «визуальных отпечатков» ароматического профиля анализируемых образцов показал, что относительная разность площадей для D_1 и D_2 составила 64.52%, для D_1 и D_3 – 68.24%, для D_1 и D_4 – 29.60%. Абсолютная разность площадей «визуальных отпечатков» составила 2905.15 Гц, 3072.38 Гц и 1332.90 Гц соответственно. В результате проведенных исследований теоретически обоснован и экспериментально подтвержден приоритетный выбор образца D_2 , выдержанного на щепе слабой степени термической обработки.

Выходы: полученный массив экспериментальных данных может быть использован при исследованиях, направленных на развитие технологий производства зерновых дистиллятов, расширение перечня идентификационных показателей и создания алгоритмов выявления фальсификаций.

Ключевые слова: зерновые дистилляты, газовая хроматография, масс-спектрометрия, капиллярный электрофорез, высокоэффективная жидкостная хроматография, электронный нос, летучие органические примеси, анионы, катионы.

Для цитирования: Шелехова Н.В. Исследование компонентного состава зерновых дистиллятов российского производства // Химия растительного сырья. 2025. №4. С. 386–398. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250415670>.

Введение

Острая необходимость технологического суверенитета в области производства алкогольных напитков обусловлена санкциями, введенными недружественными странами в отношении РФ. В целях успешной реализации политики импортозамещения важно обеспечить выпуск конкурентоспособного продукта. Это в полной мере относится и к зерновым дистиллятам. Для интенсификации технологического процесса выдержки зерновых дистиллятов в контакте с древесиной дуба и скорейшей реализации политики импортозамещения необходимо разработать технологию, позволяющую быстро обеспечить массового потребителя высококачественными напитками, приготовленными на основе зерновых дистиллятов российского производства.

Изучение литературы указывает на многолетние и многочисленные научные исследования, направленные на усовершенствование технологии производства зерновых дистиллятов [1–5]. В отличие от технологии производства этилового спирта ректифицированного из зернового сырья, при получении дистиллятов стараются сохранять компоненты, придающие дистиллятам характерный вкус и аромат [6]. Российскими исследователями разработаны различные технологические схемы получения зерновых дистиллятов [7], рассмотрена возможность их производства на существующих предприятиях, предназначенных для выпуска спирта этилового ректифицированного из зернового сырья, внедрена новая технология совместного получения ректифицированного этилового спирта и зернового дистиллята из сбраженного зернового сырья [8].

В целях обеспечения более высокого качества спиртных напитков во ВНИИПБТ разработан государственный стандарт ГОСТ Р 70225-2023 «Виски российский, дистилляты зерновые и висковые российские. Общие технические условия», регламентирующий производство виски на территории РФ. Стандарт нормирует органолептические и следующие химические показатели: массовая концентрация ацетальдегидов – в диапазоне 10–350 мг/дм³, сивушного масла – в диапазоне 500–6000 мг/дм³, сложных эфиров – в диапазоне 50–1500 мг/дм³, объемную долю метилового спирта – не более 0.05% и массовую концентрацию фурфурола – не более 30 мг/дм³ для невыдержаных зерновых дистиллятов. Для выдержаных зерновых дистиллятов показатель массовая концентрация фурфурола не нормируется.

Для потребителей спиртных напитков, приготовленных на основе зерновых дистиллятов, важными характеристиками являются вкус и аромат [9, 10]. Органолептическая оценка является неотъемлемой частью процесса контроля качества алкогольных напитков. Этот метод дает возможность получить представление о характеристиках напитка, позволяет выявить нюансы вкуса, аромата и текстуры, которые важны для оценки аутентичности и качества. Однако важно понимать, что органолептическая оценка требует определенного опыта и квалификации специалистов-дегустаторов, чтобы обеспечить объективные и точные результаты.

Невыдержанный дистиллят обладает резкими и эфирными тонами, именно поэтому для его облагораживания проводят выдержку в емкостях из специально подготовленной древесины дуба. По классической технологии невыдержанный дистиллят выдерживают в дубовых бочках, период выдержки составляет не менее трех лет. За это время протекают многочисленные химические реакции, обусловливающие характерный для выдержанных дистиллятов вкус и аромат [11]. Несмотря на проведенные многочисленные научные исследования, химические процессы, происходящие при выдержке зерновых дистиллятов, изучены далеко не полностью и развитие обозначенной тематики является актуальным и перспективным направлением исследований [12, 13]. В целях интенсификации технологического процесса выдержки зерновых дистиллятов и улучшения их органолептических характеристик ГОСТ Р 70225-2023 допускает применение так называемого «метода интенсификации» – использования дубовой щепы и клепки.

Аромат спиртных напитков формируется с участием летучих химических соединений и является одним из показателей качества. Необходимо отметить, что задача распознавания ароматной композиции спиртных напитков может быть решена с применением современных инструментальных методов анализа [14, 15] и цифровых технологий [16]. В последние годы в аналитической практике успешно развивается направление по разработке сенсорных устройств, предназначенных для анализа пищевых продуктов. Разработки в области сенсорных методов анализа представляют несомненный научный и практический интерес, так как метод имеет высокую производительность, низкую стоимость, не требует пробоподготовки, высокой квалификации персонала, химических реагентов и значительных временных затрат. Применение современных методов анализа в контроле качества и безопасности алкогольной продукции позволит вывести на новый уровень органолептический метод анализа.

В условиях цифровой трансформации современного производства для оценки органолептических показателей все большее распространение получают интеллектуальные измерительные системы типа «электронный нос», «электронный язык», «электронный глаз». Использование таких приборов обеспечивает следующие преимущества: повышение эффективности контроля, сокращение затрат на ресурсное обеспечение экспертизы, отсутствие обонятельной усталости и ограничения на количество и состав проб. Кроме того, полученная информация, хранящаяся в цифровых базах данных, может быть обработана с применением методов искусственного интеллекта.

Одним из инновационных инструментов является «электронный нос» – мультисенсорная система, предназначенная для определения запахов. Система состоит из датчиков, которые реагируют с потенциальными химическими соединениями и позволяют регистрировать различные запахи по принципу «отпечатка

пальца» [17, 18]. Современные устройства типа «электронный нос» широко используются для решения задач при анализе пищевых продуктов.

Знание химического состава зерновых дистиллятов и влияния каждого этапа технологии производства на образование тех или иных химических соединений обеспечивают основу для решения проблем, связанных с производством высококачественных спиртных напитков [19–21]. В целях детального изучения химического состава зерновых дистиллятов с применением методов газовой хроматографии, хромато-масс-спектрометрии и капиллярного электрофореза во ВНИИПБТ разработаны экспрессные аналитические методики, позволяющие с высокой степенью достоверности проводить идентификацию и количественное определение целевых химических соединений [22, 23]. В ближайшей перспективе можно ожидать появления новых инструментальных методик определения химического состава зерновых дистиллятов и дальнейшего развития инновационных технологий производства отечественных виски.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что разработки в области создания экспрессных и высокоточных аналитических методик, основанных на применении методов газовой хроматографии, хромато-масс-спектрометрии, капиллярного электрофореза, высокоэффективной жидкостной хроматографии и сенсорных методов анализа для селективного изучения химического состава зерновых дистиллятов будут способствовать изучению состава спиртных напитков и созданию инновационных, высокоэффективных, ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих производство напитков с заданными характеристиками. Не вызывает сомнений, что благодаря высокому качеству и уникальным характеристикам зерновые дистилляты и виски, произведенные на территории РФ, будут востребованы как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

Цель исследования – с применением комплекса современных инструментальных методов анализа получить новые данные о химическом составе невыдержаных и выдержаных российских зерновых дистиллятов, находившихся в контакте с древесиной дуба различной степени термической обработки.

Объекты исследования

Объектами исследования служили: образец зернового дистиллята D_1 , произведенный на территории Российской Федерации, модельные растворы, приготовленные на его основе. Для приготовления модельных растворов в мерные колбы объемом 1000 см³ вносили зерновой дистиллят D_1 и помещали по 7 г дубовой щепы «Экочипс» слабой (модельный раствор D_2), средней (D_3) и сильной (D_4) степени обжига. Модельные растворы выдерживали на протяжении 28 суток при температуре +25 °C. В качестве образца контроля использовали образец D_1 .

Методы исследования

Идентификацию и количественное определение летучих органических примесей проводили на газовом хроматографе Agilent 7890A с пламенно-ионизационным детектором (Agilent Technologies, США) по разработанной нами методике. Для подтверждения идентификации в качестве референтного применяли метод хромато-масс-спектрометрии [22], использовали газовый хроматограф «Маэстро 7820» с масс-селективным детектором (Agilent Technologies – ООО Интерлаб, Россия-США).

Идентификацию и количественное определение состава катионов, анионов органических и неорганических кислот проводили по разработанным нами методикам [23], использовали систему капиллярного электрофореза Agilent 7100 с кондуктометрическим детектированием (Agilent Technologies, США). За результат измерений принимали среднее арифметическое значение двух параллельных определений, при выполнении условия приемлемости. Границы относительной погрешности измерений – не более 5% при доверительной вероятности Р=0.95.

Идентификацию и количественное определение фенольных и фурановых проводили на жидкостном хроматографе Agilent 1200 с диодно-матричным детектором (Agilent Technologies, США) по ГОСТ 33407-2015 «Коньяки, дистилляты коньячные, бренди».

Определение водородного показателя проводили на pH-метре HI2002-03 (Hanna Instruments, Германия), оснащенном электродом HI 11310 с точностью измерений ±0.01 pH при 25 °C.

Для взятия точных навесок использовали аналитические весы неавтоматического действия GR200 (Analog&Digital, Япония) с погрешностью взвешивания не более ±0.0003 г при температуре 20 °C.

Определение аромата проводили органолептическим методом. Оценку осуществляли по количественному выражению вклада отдельных дескрипторов в сложение аромата зернового дистиллята по 5-балльной системе. Метод основан на обонятельных ощущениях дегустатора, возбуждаемых летучими веществами, содержащимися в анализируемой продукции.

Инструментальную оценку идентичности профилей аромата осуществляли на анализаторе запахов MAG-8 (ООО Сенсорика – Новые Технологии, Россия) по методологии «электронный нос» [17, 18]. Границы относительной погрешности измерений – не более 1%. Пробы выдерживали при температуре $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ не менее 30 мин, объем равновесной газовой фазы – 3 см³, общее время взвешивания – 60 с. Применили сенсоры на основе пьезокварцевых резонаторов ОАВ-типа, с базовой частотой колебаний 10.0–14.0 МГц с разнохарактерными пленочными иnanoструктурными сорбентами на электродах. Все сенсоры изготовлены, натренированы и стабилизированы в парах летучих органических соединений различной природы. Покрытия сенсоров выбирали в соответствии с задачей исследования и методикой: сенсор 1 – поливинил-пирролидон, сенсор 2 – прополис, пчелиный клей, сенсор 3 – дициклогексан-18-Краун-6, сенсор 4 – гидроксиапатит; сенсор 5 – полиэтиленгликоль, сенсор 6 – полиэтиленгликоль себацинат, сенсор 7 – полиэтиленгликоль сукцинат, сенсор 8 – тритон X-100. Сочетание выбранных сорбентов высоко селективно выделяет пары воды, полярные соединения (сенсор 1); спирты, альдегиды, амины (сенсор 2); органические полярные соединения, кислоты (сенсор 3); полярные амины (сенсор 4); кетоны, спирты (сенсор 5), амины, азотсодержащие соединения (сенсор 6); среднеполярные серо- и азотсодержащие соединения (сенсор 7); полярные соединения (сенсор 8). Для сбора и обработки откликов сенсоров использовали программное обеспечение MAG Soft [17, 18].

Результаты и их обсуждение

Исследования, проведенные нами ранее, показали, что российские невыдержаные зерновые дистилляты по содержанию летучих органических примесей и ионному составу вполне сопоставимы с импортными аналогами [22, 23]. Экспериментально подтверждена перспективность использования всех исследованных образцов невыдержаных российских зерновых дистиллятов для следующего технологического этапа – выдержки в контакте с древесиной дуба. Для проведения дальнейших исследований выбран образец Д₁ – невыдержанный дистиллят из пшеницы российского производства, содержащий наименьшие концентрации летучих органических примесей.

На первом этапе исследования с применением метода капиллярного электрофореза изучен ионный состав модельных растворов, приготовленных с использованием невыдержанного дистиллята российского производства Д₁ и дубовой щепы различной степени обжига. Установлено, что среди идентифицированных ионов превалировали ацетаты, при этом для образца Д₁ массовая концентрация ацетатов составила 1.64 мг/дм³, для Д₂ – 2.81 мг/дм³, для Д₃ – 2.65 мг/дм³, для Д₄ – 28.75 мг/дм³. Массовые концентрации калия составляли: для образца контроля Д₁ – 1.10 мг/дм³, для Д₂ – 2.18 мг/дм³, для Д₃ – 21.02 мг/дм³, для Д₄ – 4.86 мг/дм³. Массовые концентрации хлоридов составляли для образца Д₁ – 2.57 мг/дм³, для Д₂ – 2.88 мг/дм³, для Д₃ – 1.89 мг/дм³, для Д₄ – 2.76 мг/дм³.

Остальные идентифицированные ионы зарегистрированы в значительно меньших концентрациях (рис. 1).

В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных рассчитаны суммарные концентрации идентифицированных ионов: для образца Д₁ – 7.86 мг/дм³, для Д₂ – 15.91 мг/дм³, для Д₃ – 12.85 мг/дм³, для Д₄ – 49.85 мг/дм³. Показано, что при выдержке в контакте с дубовой щепой ионный состав невыдержанного зернового дистиллята существенно изменился. Во всех образцах модельных растворов обнаружено образование оксалатов (ионов щавелевой кислоты) в диапазоне 0.30–0.43 мг/дм³ и малатов (ионов яблочной кислоты) – в диапазоне 0.03–0.15 мг/дм³.

В модельных растворах, находившихся в контакте с дубовой щепой средней и сильной степени обжига, обнаружено образование сукцинатов (ионов янтарной кислоты) 0.19 и 1.50 мг/дм³, гликолятов (ионов гликолевой кислоты) 0.20 и 2.24 мг/дм³ соответственно. Фосфаты (ионы фосфорной кислоты) 0.21 и 0.73 мг/дм³, бензоаты (ионы бензойной кислоты) 0.41 и 2.26 мг/дм³ обнаружены в растворах, приготовленных с использованием щепы слабой и сильной степени обжига. Образование кислот можно объяснить их экстрагированием из дубовой щепы, при этом из щепы сильной степени обработки Д₄ экстрагировалось наибольшее количество кислот, что косвенно подтверждает и изменение уровня водородного показателя pH (рис. 2).

Повышенная кислотность снижает pH среды, что значительно интенсифицирует реакцию этерификации. С повышением кислотности зернового дистиллята содержание высших эфиров, оказывающих заметное влияние на формирования органолептических характеристик, возрастает. Однако необходимо отметить, что наряду с реакцией этерификации может протекать и обратная реакция гидролиза.

На втором этапе работ с применением метода газовой хроматографии по разработанной нами методике исследовали динамику изменения состава летучих органических примесей – эфиров, альдегидов, высших спиртов, кетонов и др. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что массовые концентрации идентифицированных летучих органических примесей в модельных растворах D_2 , D_3 и D_4 изменились по отношению к образцу контроля D_1 .

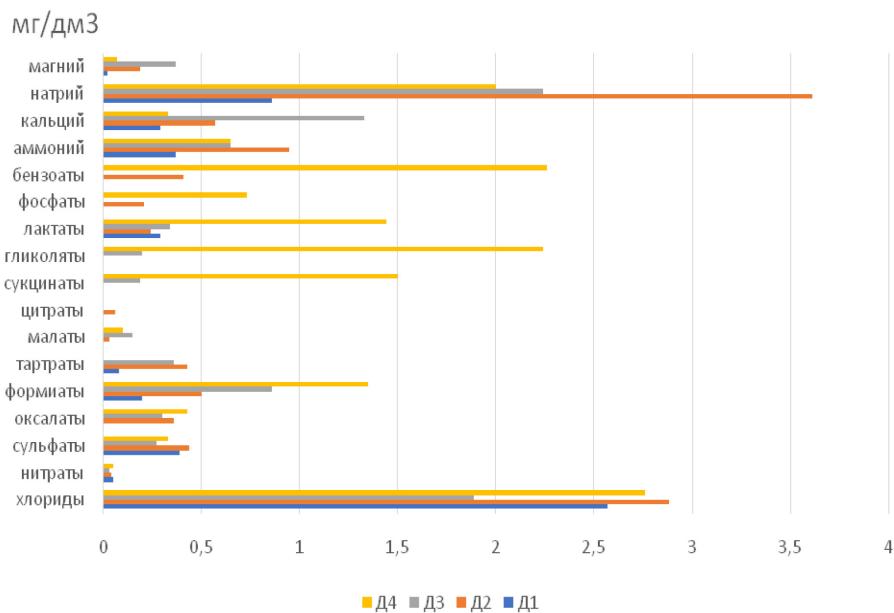


Рис. 1. Ионный состав зернового дистиллята D_1 и модельных растворов, выдержанных на щепе слабой (D_2), средней (D_3) и сильной (D_4) степени термической обработки

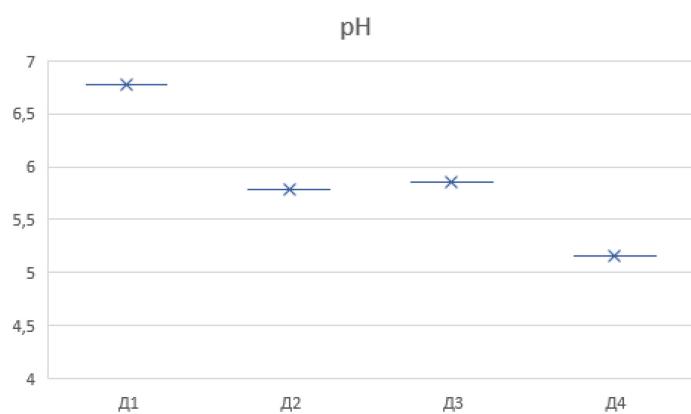


Рис. 2. Водородный показатель зернового дистиллята D_1 и модельных растворов, выдержанных на щепе слабой (D_2), средней (D_3) и сильной (D_4) степени термической обработки

Установлено, что содержание эфиров и компонентов сивушного масла соответствует диапазону концентраций, регламентируемому государственным стандартом ГОСТ Р 70225-2023 «Виски российский, дистилляты зерновые и висковые российские. Общие технические условия», принятом на территории РФ. Максимальная суммарная массовая концентрация идентифицированных летучих органических примесей 792.86 мг/дм³ обнаружена в модельном растворе D_2 , приготовленном с использованием щепы слабой степени термической обработки, затем следовали модельные растворы D_2 и D_3 , с суммарной массовой

концентраций 764.29 мг/дм³ и 767.08 мг/дм³, минимальное значение – 666.24 мг/дм³, ожидаемо, зарегистрировано в образце контроля Д₁ (табл. 1).

По данным таблицы 1 суммарное содержание эфиров для модельных растворов Д₁, Д₂, Д₃, Д₄ составляло: 56.08, 60.89, 50.25 и 49.74 мг/дм³ соответственно, компонентов сивушного масла – 588.65, 719.0, 686.59 и 678.81 мг/дм³. Необходимо отметить, что расширение перечня контролируемых показателей будет способствовать повышению качества контроля зерновых дистиллятов и позволит проводить мониторинг технологических процессов производства.

Наибольшие различия обнаружены в модельном растворе Д₂, приготовленном с использованием дубовой щепы слабой степени термической обработки. Важно обратить внимание на то, что в модельном растворе Д₂ примеси, оказывающие негативное влияние на органолептические характеристики, такие как ацетон и уксусная кислота, образовывались в меньших концентрациях, а примеси, положительно влияющие на органолептические характеристики, такие как энантовые эфиры и 2-фенилэтанол – в больших количествах.

Химический состав и органолептическая оценка зерновых дистиллятов неразрывно связаны с особенностями технологии производства. Роль отдельных химических соединений в формировании букета зернового дистиллята малоизучена, неоднозначна и зависит от массовых концентраций и композиций. Так, например, недостаточное содержание высших спиртов не обеспечивают нужную полноту вкуса, избыточное содержание – придает грубость, энантовые эфиры в малых концентрациях обладают приятным фруктовым ароматом, в значительных концентрациях могут оказывать негативное влияние на букет напитков [2].

Известно, что экстрактивные вещества выдержаных зерновых дистиллятов в основном представлены компонентами, извлекаемыми из древесины дуба и продуктами их химических превращений. Массовые концентрации экстрактивных компонентов варьируют в зависимости от продолжительности контакта, температуры, при которой осуществляется выдержка, степени термической обработки древесины дуба, макро- и микроструктуры древесины, вместимости бочек, исходного состава дистиллятов и множества других факторов [2].

На третьем этапе исследования с применением метода высокоэффективной жидкостной хроматографии изучен состав фенольных (синаповый альдегид, конифериловый альдегид, сиреневый альдегид, ванилин, сиреневая кислота, ванилиновая кислота, галловая кислота) и фурановых (5-гидроксиметилфурфурол, 2-фурфурол, 5-метилфурфурол) соединений модельных растворов. Анализ полученных результатов показал, что целевые соединения в образце невыдержанного зернового дистиллята Д₁ не обнаружены, что объясняется отсутствием контакта образца с древесиной дуба. Суммарная массовая концентрация идентифицированных соединений для модельного раствора Д₂ составила 6.10 мг/дм³, для Д₃ – 6.70 мг/дм³, для Д₄ – 23.63 мг/дм³. Необходимо отметить существенное варьирование массовых концентраций фурановых и фенольных соединений в зависимости от степени термической обработки дубовой щепы, используемой для приготовления модельных растворов.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что наименьшие концентрации фурановых соединений зарегистрированы для образца Д₂, приготовленного с применением щепы слабой степени обжига, наибольшие значения – для образца Д₄, приготовленного с применением щепы сильной степени обжига, что подтверждают известные научные данные о влиянии степени термической обработки древесины дуба на образование фурановых соединений. В исследованных образцах фурфурол зафиксирован в диапазоне 0.10–1.48 мг/дм³, 5-гидроксиметилфурфурол – в диапазоне 0.14–1.0 мг/дм³, 5-метилфурфурол – в диапазоне 0.04–0.08 мг/дм³ (рис. 3).

Компоненты фенольной природы играют значимую роль в сложении органолептических характеристик зерновых дистиллятов, обусловливают мягкость и бархатистость вкуса, участвуют в формировании характерной янтарно-золотистой окраски. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что основным компонентом фенольных соединений являлась сиреневая кислота, массовая концентрация которой варьировала в диапазоне 2.04–5.59 мг/дм³ (рис. 4).

Сиреневая кислота, так же, как и ванилин, является продуктом окислительной деградации лигнина древесины дуба, формируя ванильные ноты в букете выдержаных зерновых дистиллятов. Установлено, что массовая концентрация ванилина в исследованных образцах варьировала в диапазоне 0.19–2.91 мг/дм³, ванилиновой кислоты – в диапазоне 0.46–2.16 мг/дм³. Массовые концентрации кониферилового и синашевого альдегида варьировали в диапазоне 0.07–0.86 и 0.12–0.44 мг/дм³ соответственно. Важно подчеркнуть, что максимальные концентрации ванилина, ванилиновой кислоты, сиреневой кислоты, сиреневого и синашевого альдегидов зарегистрированы в образце Д₄, выдержанном на дубовой щепе сильной степени обжига.

Таблица 1. Состав летучих органических примесей зернового дистиллята Δ_1 и модельных растворов, выдержаных на щепе слабой (Δ_2), средней (Δ_3) и сильной (Δ_4) степени термической обработки

Аналит, мг/дм ³	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
апетальдегид	19.64±0.98	26.76±1.34	23.25±1.16	23.11±1.15
ацетон	0.66±0.03	1.15±0.06	1.31±0.07	1.51±0.08
этилформиат	не обнаружено	не обнаружено	0.46±0.02	не обнаружено
этилацетат	54.15±2.71	57.54±2.88	47.20±2.36	47.06±2.35
метанол, % об.	0.00038±0.00002	0.00468±0.00023	0.00445±0.00022	0.00465±0.00023
2-пропанол	1.9±0.10	2.43±0.12	2.30±0.12	2.18±0.11
2-бутанол	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено	не обнаружено
1-пропанол	76.94±3.85	98.21±4.91	95.39±4.77	95.35±4.77
изобутанол	251.64±12.58	274.13±13.71	270.61±13.53	267.05±13.35
изоамилацетат	0.71±0.03	0.77±0.04	0.86±0.04	0.92±0.05
1-бутанол	0.90±0.04	0.85±0.04	0.81±0.04	0.88±0.04
изоамилол	256.94±12.85	324.1±16.2	317.02±15.85	312.91±15.65
1-пентанол	0.33±0.02	0.47±0.02	0.46±0.02	0.44±0.02
этиллактат	0.84±0.04	1.39±0.07	0.97±0.05	1.03±0.05
этилкаприлат	0.38±0.02	0.45±0.02	0.38±0.02	0.41±0.02
уксусная кислота	1.21±0.06	1.27±0.06	1.51±0.07	11.65±0.58
фурфурол	не обнаружено	0.16±0.02	1.11±0.05	2.00±0.10
этилкапринат	не обнаружено	0.46±0.02	0.26±0.01	0.23±0.01
этиллаурат	не обнаружено	0.28±0.01	0.12±0.01	0.09±0.01
2-фенилэтанол	не обнаружено	0.75±0.04	0.40±0.02	0.27±0.01

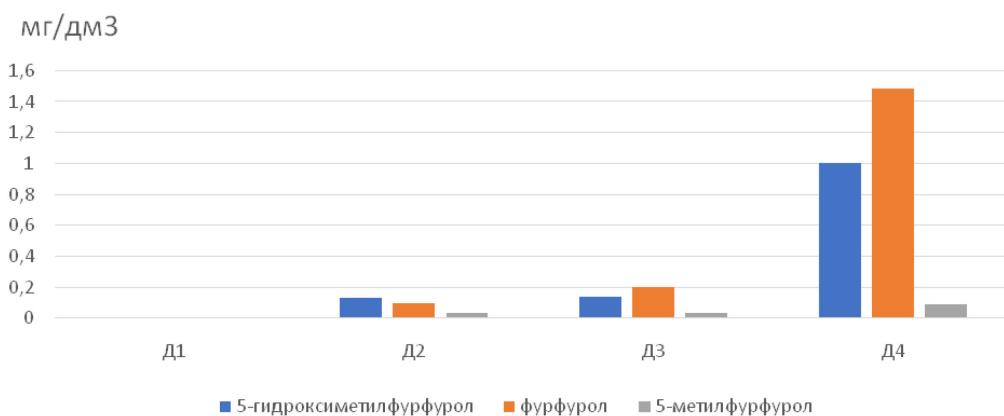


Рис. 3. Состав фурановых соединений зернового дистиллята Δ_1 и модельных растворов, выдержаных на щепе слабой (Δ_2), средней (Δ_3) и сильной (Δ_4) степени термической обработки

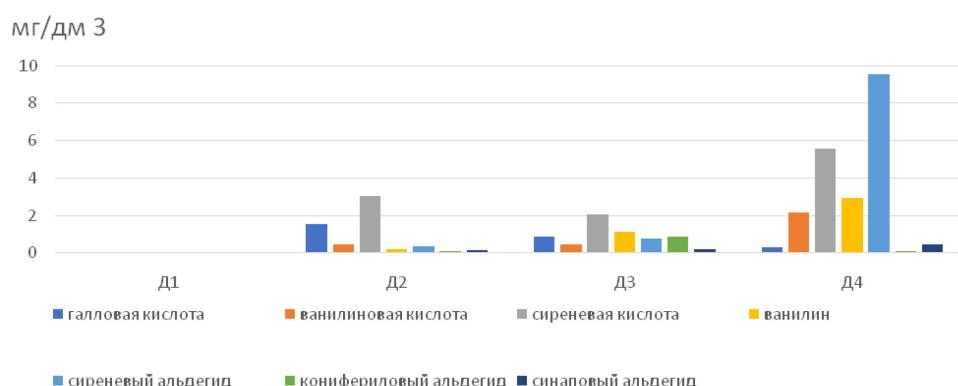


Рис. 4. Состав фенольных соединений зернового дистиллята Δ_1 и модельных растворов, выдержаных на щепе слабой (Δ_2), средней (Δ_3) и сильной (Δ_4) степени термической обработки

При контакте с древесиной дуба в дистилляты переходят дубильные вещества, преимущественно представленные галловой и эллаговой кислотами, при этом накопление галловой кислоты происходит пропорционально времени выдержки [2]. Максимальная концентрация галловой кислоты 1.55 мг/дм³ найдена в образце D_2 , выдержанном на щепе слабой степени обжига, минимальная – 0.29 мг/дм³ в образце D_4 , выдержанном на щепе сильной степени обжига.

На четвертом этапе работ проведена инструментальная оценка идентичности запаха модельных растворов. Использовали мультисенсорную систему типа «электронный нос», позволяющую получить многомерный аналитический сигнал в виде цифрового кода. Установлено, что сигналы всех сенсоров превышают уровень шумов, поэтому информация всего массива может рассматриваться как значимая.

В ходе исследований получены новые экспериментальные данные об ароматических профилях зерновых дистиллятов российского производства. Для определения близости состава равновесных газовых фаз над исследуемыми образцами оценивали величины максимальных сигналов отдельных сенсоров на площади 3 см³ за 60 с нагрузки парами (табл. 2).

На основании анализа полученных данных (табл. 2) выявлена различная реакция сенсоров в парах равновесных газовых фаз над образцами зерновых дистиллятов. Максимальные отклики, зафиксированные для образца D_1 получены с сенсорами 4 и 6, для образца D_2 – с сенсорами 1, 2, 3, для D_3 – с сенсорами 5 и 7, для D_4 – с сенсором 8.

В ходе исследования оценивали суммарную площадь под выходными кривыми всех сенсоров, прямо пропорциональную массе летучих соединений, сорбируемых покрытыми выбранного массива сенсоров (рис. 5).

Ожидаемо, наименее насыщенными оказались пары равновесной газовой фазы образца невыдержанного зернового дистиллята D_1 с суммарной площадью под выходными кривыми всех сенсоров 4502 Гц. Среди модельных растворов, выдержанных на дубовой щепе, наиболее близкими оказались образцы D_2 и D_3 , с суммарными площадями 7407 и 7575 Гц соответственно, наименее насыщенной оказалась проба D_4 с суммарной площадью 5835 Гц.

Сравнительный анализ «визуальных отпечатков» ароматического профиля анализируемых образцов показал, что относительная разность площадей для D_1 и D_2 составила 64.52%, для D_1 и D_3 – 68.24%, для D_1 и D_4 – 29.60%, абсолютная разность площадей составила 2905.15, 3072.38 и 1332.90 Гц соответственно (рис. 6).

Наибольшие различия обнаружены между образцом невыдержанного зернового дистиллята D_1 и образцами D_2 , D_3 , D_4 , выдержанными в контакте с древесиной дуба, что подтверждает известные научные данные об изменении химического состава дистиллятов, выдержанных в контакте с древесиной дуба. Сравнение «визуальных отпечатков» ароматического профиля образцов выдержанного зернового дистиллята показало, что наиболее близкими оказались образцы D_2 и D_3 , приготовленные с использованием дубовой щепы слабой и средней степени термической обработки: относительная разность площадей составила 2.26%, абсолютная разность – 167.23 Гц (рис. 7А). Для образцов D_2 и D_4 относительная разность площадей составила 22.96%, абсолютная разность – 1739.48 Гц (рис. 7Б).

Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что при органолептической оценке дегустаторами будет выделен образец D_1 , как максимально отличающийся от остальных образцов. Образцы D_2 и D_3 и наиболее близки и отличаются от пробы D_4 .

На пятом этапе исследования проводили оценку аромата органолептическим методом, которая подтвердила, что выдержка в контакте с древесиной дуба различной степени термической обработки заметно повышает органолептические характеристики невыдержанного зернового дистиллята.

Таблица 2. Абсолютные отклики сенсоров

Наименование образца	Отклики сенсоров в парах равновесных газовых фаз над пробами, Гц·с							
	Сенсор 1	Сенсор 2	Сенсор 3	Сенсор 4	Сенсор 5	Сенсор 6	Сенсор 7	Сенсор 8
D_1	37	46	38	25	53	43	21	66
D_2	75	72	74	24	40	32	21	53
D_3	70	64	70	24	59	36	23	69
D_4	67	60	61	19	51	33	18	52

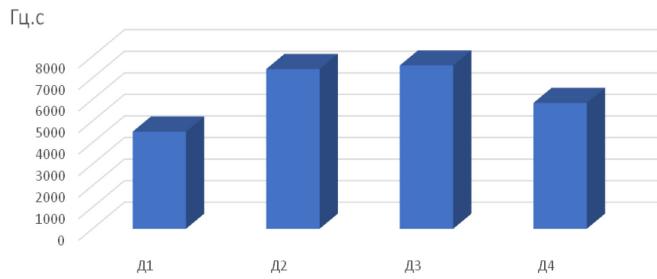


Рис. 5. Суммарная площадь под выходными кривыми всех сенсоров

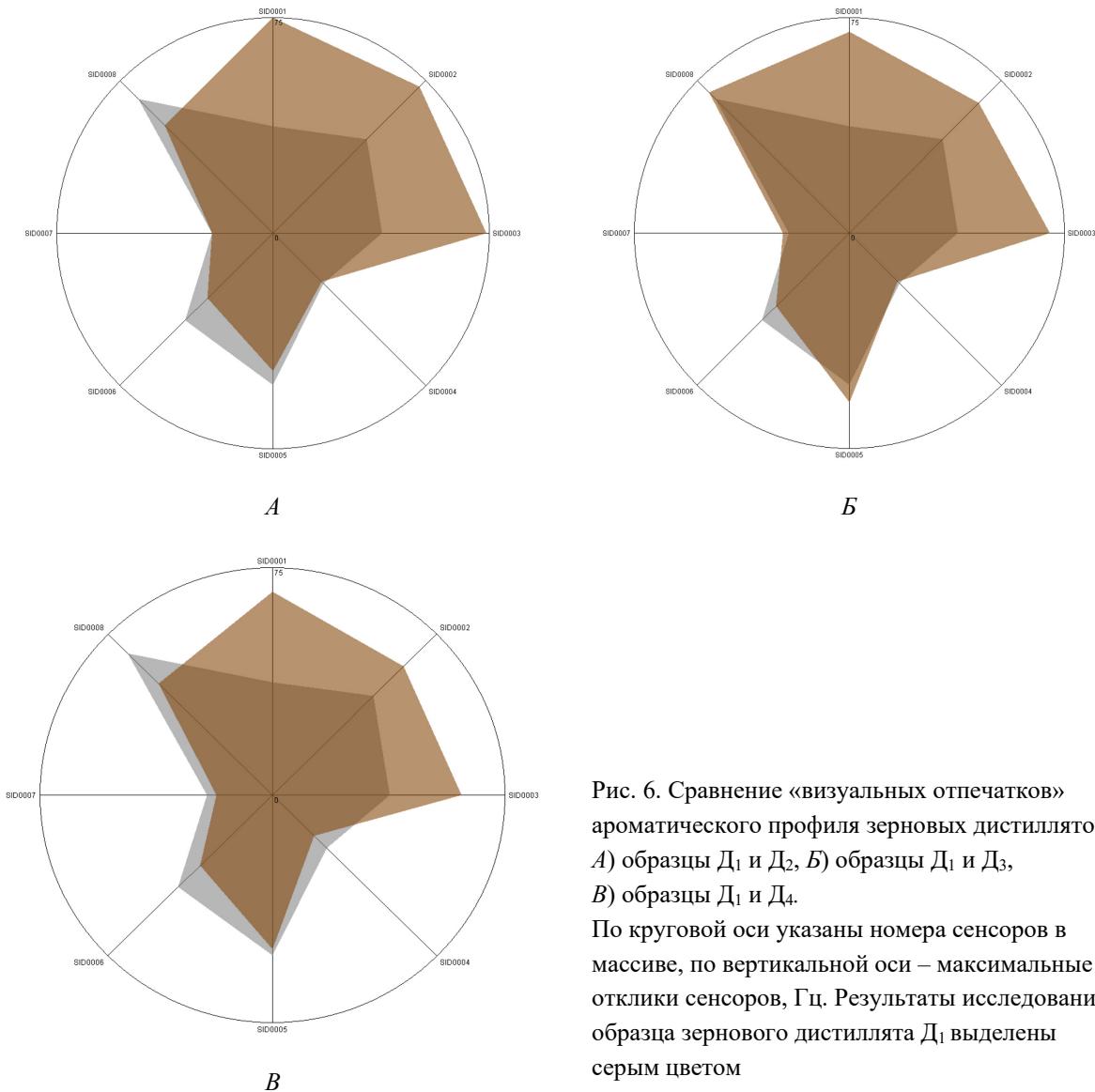


Рис. 6. Сравнение «визуальных отпечатков» ароматического профиля зерновых дистиллятов:
A) образцы Д₁ и Д₂, B) образцы Д₁ и Д₃,

B) образцы Д₁ и Д₄.

По круговой оси указаны номера сенсоров в массиве, по вертикальной оси – максимальные отклики сенсоров, Гц. Результаты исследования образца зернового дистиллята Д₁ выделены серым цветом

Согласно известным научным данным, интенсивность обжига дубовой щепы обеспечивает ароматический профиль будущего напитка, делая его более изысканным и утонченным, создавая нежный и гармоничный букет. Легкая прожарка дубовой щепы придает напиткам тонкие ванильные, фруктовые и цветочные ноты, при средней прожарке дубовая щепа способствует формированию более выраженных ароматов ванили, миндаля, кокоса, пряностей, сильная прожарка – обеспечивает дымные и шоколадные ароматы, которые формируют более глубокий и насыщенный вкус, добавляя нюансы и сложности.

Наиболее высокую оценку получил образец Д₂, выдержаный на дубовой щепе слабой степени термической обработки, который отличался гармоничным вкусом с легкими оттенками сухофруктов, сложным ароматом с ярко выраженными фруктовыми и цветочными оттенками (рис. 8).

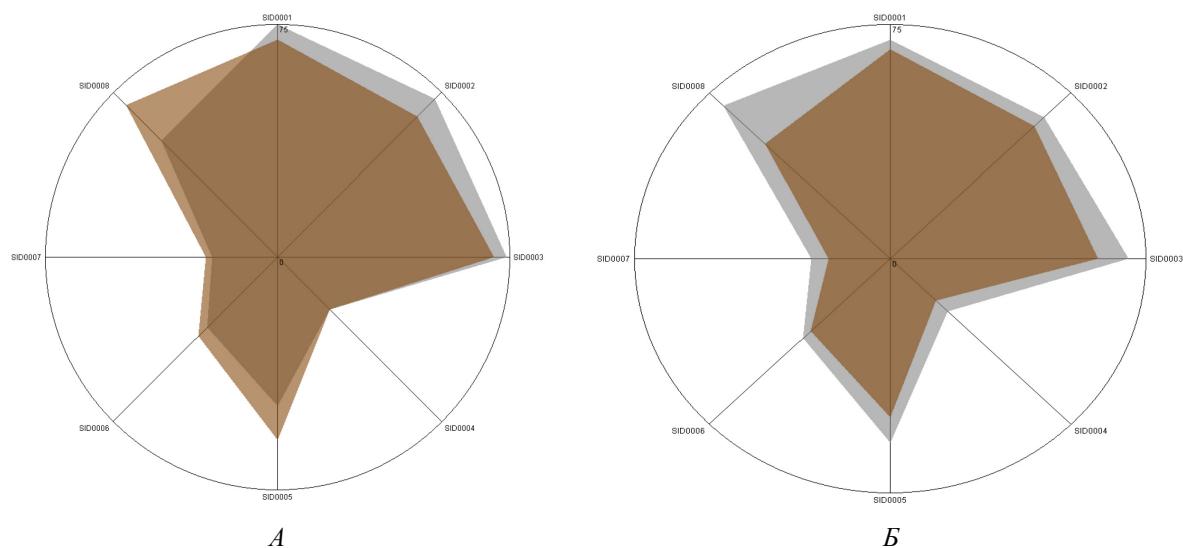


Рис. 7. Сравнение «визуальных отпечатков» ароматического профиля зерновых дистиллятов
A) образцы D_2 и D_3 , B) образцы D_2 и D_4

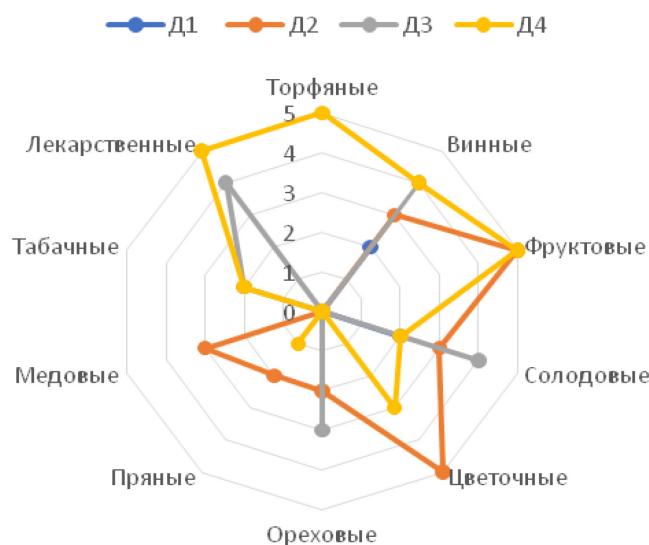


Рис. 8. Лепестковая диаграмма ароматического профиля зернового дистиллята D_1 , и модельных растворов, выдержаных на щепе слабой (D_2), средней (D_3) и сильной (D_4) степени термической обработки (0 – не воспринимается, 1 – слабо воспринимается, 2 – довольно слабо воспринимается, 3 – средне воспринимается, 4 – довольно сильно воспринимается, 5 – сильно воспринимается)

Основу ароматического профиля образца D_2 составляли цветочные и медово-фруктовые дескрипторы. Известно, что эфирам принадлежит значимая роль в формировании органолептических характеристик зерновых дистиллятов. Этилацетат имеет приятный фруктовый аромат, этилформиат обладает характерным запахом рома, изоамилацетат характерен ярко выраженным ароматом груши и банана, этиллактат придает напиткам аромат рома, фруктов и крема, этилкаприлат – запах банана и прелого сена одновременно, этилкапринат имеет выраженный фруктово-цветочный аромат, этиллаурат – сладковатый аромат с цветочными нотами [2].

Согласно результатам проведенного хроматографического исследования (табл. 1), в составе летучих органических примесей образца D_2 в больших массовых концентрациях обнаружены: этилацетат 57.54 мг/дм³ – против 47.20 и 47.06 мг/дм³ для образцов D_3 и D_4 , этиллактат 1.39 мг/дм³ против 0.97 и 1.03 мг/дм³, этилкаприлат 0.45 мг/дм³ против 0.38 и 0.41 мг/дм³, этилкапринат 0.46 мг/дм³ против 0.26 и 0.23 мг/дм³, этиллаурат 0.28 мг/дм³ против 0.12 и 0.09 мг/дм³ соответственно. Кроме того, массовая концентрация 2-фенилэтанола, обладающего ароматом розы с цветочно-медовыми оттенками, для образца D_2 составила 0.75 мг/дм³, для D_3 – 0.40 мг/дм³, для D_4 – 0.27 мг/дм³. Важно отметить, что наименьшие массовые концентрации ацетона 1.15 мг/дм³ и уксусной кислоты 1.27 мг/дм³ также найдены в образце D_2 .

Таким образом, выбор в пользу образца D_2 обусловлен присутствием в его составе в больших количествах химических соединений, положительно влияющих на органолептические характеристики, и в меньших – анализов, оказывающих негативное влияние, что подтверждают полученные в ходе настоящего исследования экспериментальные данные.

Выходы

1. Показано, что комплексный подход, основанный на применении методов газовой хроматографии, хромато-масс-спектрометрии, капиллярного электрофореза, высокоеффективной жидкостной хроматографии, сенсорных методов анализа дает наиболее полное представление о составе зерновых дистиллятов.

2. Сформирован массив экспериментальных данных о химическом составе зерновых дистиллятов, детализирующий состав летучих органических примесей, ионный состав, состав фенольных и фурановых соединений. Проведенное исследование позволяет расширить перечень идентификационных показателей в контроле качества и безопасности алкогольной продукции.

3. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден приоритетный выбор образца D_2 , выдержанного на щепе слабой степени термической обработки. Внедрение предложенного подхода в практику промышленных предприятий позволит не только контролировать этапы технологии производства и оценивать качественные характеристики готового продукта, но и разрабатывать новые технологические приемы, обеспечивающие выпуск продукции с заданными качественными характеристиками.

4. Результаты исследования вносят вклад в решение задачи импортозамещения спиртных напитков, приготовленных на основе зерновых дистиллятов российского производства.

Финансирование

Исследования проведены за счет средств субсидии на выполнение государственного задания (тема № FGMF-2025-0009).

Конфликт интересов

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Morris S., Byrne J.L., Murphy B., Whelan S.J., Carroll J.P., Ryan D. The Optimisation of Cooking Parameters for Spirit Whiskey Production from Native Irish Wheat: A Response Surface Method Approach // Foods. 2022. Vol. 11. 1199. <https://doi.org/10.3390/foods11091199>.
2. Скурихин И.М. О химических процессах, происходящих при выдержке коньячных спиртов в дубовых бочках // Виноделие и виноградарство СССР. 1960. №1. С. 8–15.
3. Guo S., Wang D., Li Y., Li J., Du J. Comparison of Aroma Profiles of Whiskeys Fermented from Different Grain Ingredients // Foods. 2024. Vol. 13(13). 2031. <https://doi.org/10.3390/foods13132031>.
4. Waymark C., Hill A.E. The influence of yeast strain on whisky new make spirit aroma // Fermentation. 2021. Vol. 7(4). 311. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040311>.
5. Bathgate G.N. The Influence of Malt and Wort Processing on Spirit Character: The Lost Styles of Scotch Malt Whisky // J. Inst. Brew. 2019. Vol. 125. Pp. 200–213. <https://doi.org/10.1002/jib.556>.
6. Рудаков О.Б., Никитина С.Ю. Тренды в аналитическом контроле качества питьевого этанола // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21, №3. С. 180–196. <https://doi.org/10.15826/analitika.2017.21.3.010>.
7. Крикунова Л.Н., Дубинина Е.В., Свиридов Д.А., Томгоров С.М. Методология оптимизации режимов дистillationи на основе оценки качества продукта // Техника и технология пищевых продуктов. 2023. Т. 53, №2. С. 326–334. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2437>.
8. Никитина С.Ю., Шахов С.В., Гордиенко А.С. Опыт внедрения новой технологии совместного получения сертифицированного этилового спирта и спиртового дистиллята из сброшенного зернового сырья // Пищевая промышленность. 2020. №4. С. 10–15. <https://doi.org/10.24411/2072-9650-2020-10037>.
9. Ashmore P.L., DuBois A., Tomasino E., Harbertson J.F., Collins T.S. Impact of Dilution on Whisky Aroma: A Sensory and Volatile Composition Analysis // Foods. 2023. Vol. 12. 1276. <https://doi.org/10.3390/foods12061276>.
10. Kelly T.J., O'Connor C., Kilcawley K.N. Sources of Volatile Aromatic Congeners in Whiskey // Beverages. 2023. Vol. 9(3). 64. <https://doi.org/10.3390/beverages9030064>.
11. Marcilionyte R., Johnston C., Maskell D.L., Mayo J., Robertson D., Griggs D., Holmes C.P. Roasted Malt for Distilling: Impact on Malt Whisky New Make Spirit Production and Aroma Volatile Development // J. Am. Soc. Brew. Chem. 2022. Vol. 80. Pp. 329–340. <https://doi.org/10.1080/03610470.2022.2034133>.
12. Stanzer D., Hanousek Cica K., Blesić M., Smajic Murtic M., Mrvcic J., Spaho N. Alcoholic Fermentation as a Source of Congeners in Fruit Spirits // Foods. 2023. Vol. 12(10). 1951. <https://doi.org/10.3390/foods12101951>.
13. He N.X., Bayen S. An overview of chemical contaminants and other undesirable chemicals in alcoholic beverages and strategies for analysis // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2020. Vol. 19(6). Pp. 3916–3950. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12649>.

14. Roullier-Gall C., Signoret J., Coelho C., Hemmler D., Kajdan M., Lucio M., Schafer B., Gougeon R.D., Schmitt-Kopplin P. Influence of regionality and maturation time on the chemical fingerprint of whisky // Food Chemistry. 2020. Vol. 323. 126748. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126748>.
15. Kew W., Goodall I., Clarke D., Uhrin D. Chemical diversity and complexity of Scotch whisky as revealed by high-resolution mass spectrometry // Journal of the American Society for Mass Spectrometry. 2017. Vol. 28(1). Pp. 200–213. <https://doi.org/10.1007/s13361-016-1513-y>.
16. Wisniewska P. Authentication of whisky due to its botanical origin and way of production by instrumental analysis and multivariate classification methods // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2017. Vol. 173. Pp. 849–853. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.10.042>.
17. Kuchmenko T.A., Lvova L.B. A Perspective on Recent Advances in Piezoelectric Chemical Sensors for Environmental Monitoring and Foodstuffs Analysis // Chemosensors. 2019. Vol. 7(3). Pp. 39–45. <https://doi.org/10.3390/chemosensors7030039>.
18. Kuchmenko T., Lvova L. Chemoresponsive Materials: Smart Materials for Chemical and Biological Stimulation: Edition 2. 2022. 646 p.
19. Okolo C.A., Kilcawley K.N., O'Connor C. Recent advances in whiskey analysis for authentication, discrimination, and quality control // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2023. Vol. 22(6). Pp. 4957–4992. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13249>.
20. Power A.C., Jones J., NiNeil C., Geoghegan S., Warren S., Curran S., Cozzolino D. What's in this drink? Classification and adulterant detection in Irish Whiskey samples using near infrared spectroscopy combined with chemometrics // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021. Vol. 101(12). Pp. 5256–5263. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11174>.
21. Joshi I., Truong V.K., Chapman J., Cozzolino D. The use of two-dimensional spectroscopy to interpret the effect of temperature on the near infrared spectra of whisky // Journal of Near Infrared Spectroscopy. 2020. Vol. 28(3). Pp. 148–152. <https://doi.org/10.1177/0967033520905>.
22. Шелехова Н.В. Экспресс-метод определения летучих органических примесей в спиртных дистиллированных напитках на основе сочетания ГХ/ПИД и ГХ/МСД // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, №1. С. 58–68. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9021>.
23. Шелехова Н.В. Экспресс метод определения анионов в алкогольных напитках на основе сочетания КЭ-КД // Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, №2. С. 199–215. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11144>.

Поступила в редакцию 1 августа 2024 г.

После переработки 1 октября 2024 г.

Принята к публикации 23 сентября 2025 г.

Shelekhova N.V. INVESTIGATION OF THE COMPONENT COMPOSITION OF GRAIN DISTILLATES PRODUCED IN RUSSIA

Russian Research Institute of Food Biotechnology is a Branch of Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety, str. Samokatnaya, 4b, Moscow, 111033, Russia, 4953610101@mail.ru

Introduction. Russian whiskey has appeared relatively recently, however, the domestic drink has very good prospects. In order to successfully implement the import substitution policy, it is important to ensure the release of competitive alcoholic beverages of Russian origin. Knowledge of the chemical composition of grain distillates and the influence of each stage of the production process on the formation of chemical compounds will provide the basis for solving problems associated with the production of high-quality alcoholic beverages.

Research objective: using a set of modern analysis methods, to obtain new data on the chemical composition of Russian grain distillates

Research objects and methods. Grain distillate of Russian production and model solutions prepared on its basis. The ionic composition was determined by capillary electrophoresis, the composition of volatile organic impurities – by gas chromatography, the composition of phenolic and furan compounds – by high-performance liquid chromatography, odor assessment was carried out using an electronic sensory system and a tasting method.

Results and their discussion. The component composition of aged and unaged distillates of Russian production was established. The total concentrations of the identified ions were determined: for sample D₁ – 7.86 mg/dm³, for D₂ – 15.91 mg/dm³, for D₃ – 12.85 mg/dm³, for D₄ – 49.85 mg/dm³. It was found that the maximum total mass concentration of the identified volatile organic impurities of 792.86 mg/dm³ was detected in the model solution D₁. The total mass concentration of the identified phenolic and furan compounds for the model solution D₂ was 6.10 mg/dm³, for D₃ – 6.70 mg/dm³, for D₄ – 23.63 mg/dm³. A comparative analysis of the "visual fingerprints" of the aromatic profile of the analyzed samples showed that the relative difference in areas for D₁ and D₂

was 64.52%, for D₁ and D₃ – 68.24%, for D₁ and D₄ – 29.60%. The absolute difference in the areas of "visual fingerprints" was 2905.15 Hz, 3072.38 Hz and 1332.90 Hz, respectively. As a result of the studies, the priority choice of the D₂ sample aged on chips of a low degree of heat treatment was theoretically substantiated and experimentally confirmed.

Conclusions: The obtained array of experimental data can be used in studies aimed at developing grain distillate production technologies, expanding the list of identification indicators and creating algorithms for detecting counterfeits.

Keywords: grain distillates, gas chromatography, mass spectrometry, capillary electrophoresis, high-performance liquid chromatography, electronic nose, volatile organic impurities, anions, cations.

For citing: Shelekhova N.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 4, pp. 386–398. (in Russ.).
<https://doi.org/10.14258/jcprm.20250415670>.

References

1. Morris S., Byrne J.L., Murphy B., Whelan S.J., Carroll J.P., Ryan D. *Foods*, 2022, vol. 11, 1199. <https://doi.org/10.3390/foods11091199>.
2. Skurikhin I.M. *Vinodeliye i vinogradarstvo SSSR*, 1960, no. 1, pp. 8–15. (in Russ.).
3. Guo S., Wang D., Li Y., Li J., Du J. *Foods*, 2024, vol. 13(13), 2031. <https://doi.org/10.3390/foods13132031>.
4. Waymark C., Hill A.E. *Fermentation*, 2021, vol. 7(4), 311. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040311>.
5. Bathgate G.N. *J. Inst. Brew.*, 2019, vol. 125, pp. 200–213. <https://doi.org/10.1002/jib.556>.
6. Rudakov O.B., Nikitina S.Yu. *Analitika i kontrol'*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 180–196. <https://doi.org/10.15826/analitika.2017.21.3.010>. (in Russ.).
7. Krikunova L.N., Dubinina Ye.V., Sviridov D.A., Tomgorov S.M. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh produktov*, 2023, vol. 53, no. 2, pp. 326–334. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2437>. (in Russ.).
8. Nikitina S.Yu., Shakhov S.V., Gordiyenko A.S. *Pishchevaya promyshlennost'*, 2020, no. 4, pp. 10–15. <https://doi.org/10.24411/2072-9650-2020-10037>. (in Russ.).
9. Ashmore P.L., DuBois A., Tomasino E., Harbertson J.F., Collins T.S. *Foods*, 2023, vol. 12, 1276. <https://doi.org/10.3390/foods12061276>.
10. Kelly T.J., O'Connor C., Kilcawley K.N. *Beverages*, 2023, vol. 9(3), 64. <https://doi.org/10.3390/beverages9030064>.
11. Marcilionyte R., Johnston C., Maskell D.L., Mayo J., Robertson D., Griggs D., Holmes C.P. *J. Am. Soc. Brew. Chem.*, 2022, vol. 80, pp. 329–340. <https://doi.org/10.1080/03610470.2022.2034133>.
12. Stanzer D., Hanousek Cica K., Blesić M., Smajic Murtic M., Mrvcic J., Spaho N. *Foods*, 2023, vol. 12(10), 1951. <https://doi.org/10.3390/foods12101951>.
13. He N.X., Bayen S. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2020, vol. 19(6), pp. 3916–3950. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12649>.
14. Roullier-Gall C., Signoret J., Coelho C., Hemmler D., Kajdan M., Lucio M., Schafer B., Gougeon R.D., Schmitt-Kopplin P. *Food Chemistry*, 2020, vol. 323, 126748. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126748>.
15. Kew W., Goodall I., Clarke D., Uhrin D. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2017, vol. 28(1), pp. 200–213. <https://doi.org/10.1007/s13361-016-1513-y>.
16. Wisniewska P. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, vol. 173, pp. 849–853. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.10.042>.
17. Kuchmenko T.A., Lvova L.B. *Chemosensors*, 2019, vol. 7(3), pp. 39–45. <https://doi.org/10.3390/chemosensors7030039>.
18. Kuchmenko T., Lvova L. *Chemoresponsive Materials: Smart Materials for Chemical and Biological Stimulation: Edition 2*, 2022, 646 p.
19. Okolo C.A., Kilcawley K.N., O'Connor C. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2023, vol. 22(6), pp. 4957–4992. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13249>.
20. Power A.C., Jones J., NiNeil C., Geoghegan S., Warren S., Currihan S., Cozzolino D. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, vol. 101(12), pp. 5256–5263. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11174>.
21. Joshi I., Truong V.K., Chapman J., Cozzolino D. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2020, vol. 28(3), pp. 148–152. <https://doi.org/10.1177/0967033520905>.
22. Shelekhova N.V. *Sorbtionnye i khromatograficheskiye protsessy*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 58–68. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9021>. (in Russ.).
23. Shelekhova N.V. *Sorbtionnye i khromatograficheskiye protsessy*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 199–215. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11144>. (in Russ.).

Received August 1, 2024

Revised October 1, 2024

Accepted September 23, 2025

Сведения об авторе

Шелехова Наталья Викторовна – доктор технических наук, заведующая лабораторией хроматографии,
 4953610101@mail.ru

Information about author

Shelekhova Natalia Viktorovna – Doctor of Technical Sciences, Head of the Chromatography Laboratory,
 4953610101@mail.ru