

Применение сенсорных технологий для функционального контроля дрожжей Kveik в производстве пива

***Т.А. Кучменко^{1, 2}, Я.Р. Арустамов¹, Р.У. Умарханов¹, И.В. Новикова¹**

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Российская Федерация, 394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19

²ФГБУН «Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского

Российской академии наук»

Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 19

*Адрес для переписки: Кучменко Татьяна Анатольевна, E-mail: tak1907@mail.ru,
Умарханов Руслан Умарханович, E-mail: rus270487@mail.ru

Поступила в редакцию 09 января 2025 г., после доработки – 04 марта 2025 г.

В статье рассматриваются результаты анализа равновесной газовой фазы над пробами пива, приготовленного с применением различных видов дрожжей при разной температуре. Приоритетная задача исследования - изучение летучего профиля напитков при использовании новых штаммов дрожжей Kveik. Важность подбора условий функционирования новых штаммов связана с их высокой стрессовой устойчивостью к температурам брожения и уровню этанола, что перспективно для производства новых видов напитков. Второй задачей являлась оптимизация набора методов анализа для ускорения процесса инжиниринга пивоварения. В работе сопоставлены результаты анализа проб пива методами газовой хроматографии и инструментальной оценки летучей фракции с применением системы искусственного обоняния (пьезосенсорный анализатор газов «МАГ-8»). По результатам анализа равновесной газовой фазы над пробами пива установлено, что содержание формирующих запах соединений (преимущественно спиртов, альдегидов, кетонов) зависит от природы дрожжей и температуры сбраживания. Это согласуется с результатами газовой хроматографии, особенностями технологии. Разработанные алгоритмы обработки данных по сигналам массива неселективных сенсоров позволили оценить относительное содержание отдельных классов соединений, сопоставить пробы по интенсивности запаха, оценить влияние температуры и длительности хранения на изменения состава летучих соединений в разных образцах пива. Установлен ряд особенностей изменения насыщенности запаха напитка при хранении в зависимости от природы дрожжей и температуры брожения. Пробы, полученные при 40 °С с дрожжами вида Kveik, сохраняют аромат лучше, чем полученные с применением стандартных дрожжей. Низкая температура брожения (25 °С) не позволяет дрожжам Kveik в полной мере развить аромат напитка, при температуре 32 °С достигается максимальная его насыщенность. При хранении больше всего изменяется состав летучей фракции пива именно для этих условий сбраживания, а наиболее стабилен состав летучей фракции соединений для проб, полученных с применением инновационных дрожжей Kveik при 40 °С. По сравнению с газовой хроматографией технология систем искусственного обоняния не дает точных оценок содержания отдельных соединений в пиве, но оценивает закономерности изменения состава летучей фракции. Для приборов с методологией «электронный нос» не требуется дополнительная пробоподготовка проб, время измерения составляет 60 с, результаты, обработанные по авторским подходам наглядны и просты для сравнения. При повторяемости сигналов сенсоров 5 % уровень значимого различия интегральных сигналов массива сенсоров приняли равным 15 %. Применен новый метод цветокодирования результатов пьезокварцевого микровзвешивания, по которому пробы разбиты на группы по цветовым меткам, что позволяет быстро сравнить близость и отличие состава летучих соединений проб без детализации состава.

Ключевые слова: инжиниринг продукта, пиво, эффективность, биотехнология, дрожжи, контроль, анализ, сенсоры, электронный нос

Application of sensor technologies for functional control of Kveik yeast in beer production

***Tatyana A. Kuchmenko^{1,2}, Yanis R. Arustamov¹, Ruslan U. Umarkhanov¹, Inna V. Novikova¹**

¹«Voronezh State University of Engineering Technologies»,
19 Revolution Ave., Voronezh, 94036, Russian Federation

²«Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry named after V.I. Vernadsky»
19 Kosygina Str., Moscow, 119334, Russian Federation

*Corresponding authors: Tatyana A. Kuchmenko, E-mail: tak1907@mail.ru,
Ruslan U. Umarkhanov, E-mail: rus270487@mail.ru

Submitted 09 January 2024, received in revised form 04 March 2025

The results of analysis of the equilibrium gas phase over beer samples prepared using different yeast types at various temperatures are considered. The priority objective of the study is investigating the volatile profile of beverages using new Kveik yeast strains. The importance of selecting the operating conditions for the new strains is associated with their high stress resistance to fermentation temperatures and ethanol levels, which is promising for the production of new beverages. The second objective was optimizing a set of analysis methods to speed up the brewing engineering process. The paper compares the results of beer sample analysis using gas chromatography and instrumental assessment of the volatile fraction using an artificial olfactory system ("MAG-8" piezosensor gas analyzer). Based on the results of the equilibrium gas phase analysis over the beer samples, it was found that the content of odor-forming compounds (mainly alcohols, aldehydes, ketones) depends on the nature of the yeast and the fermentation temperature. This is consistent with the results of gas chromatography and the features of the technology. The developed algorithms for processing data from signals of an array of non-selective sensors made it possible to estimate the relative content of individual classes of compounds, compare samples by odor intensity, and evaluate the effect of temperature and storage time on changes in the composition of volatile compounds in different beer samples. A number of features of changes in the saturation of the drink odor during storage were established depending on the nature of the yeast and the fermentation temperature. Samples obtained at 40 °C with Kveik yeast retain the aroma better than those obtained using standard yeast. Low fermentation temperature (25 °C) does not allow Kveik yeast to fully develop the aroma of the drink; at a temperature of 32 °C, its maximum saturation is achieved. During storage, the composition of the volatile fraction of beer changes the most for these fermentation conditions, and the composition of the volatile fraction of compounds is the most stable for samples obtained using innovative Kveik yeast at 40 °C. Compared with gas chromatography, the technology of artificial olfactory systems does not provide accurate estimates of the content of individual compounds in beer, but it does evaluate the patterns of change in the composition of the volatile fraction. For devices with the "electronic nose" methodology, no additional sample preparation is required, the measurement time is 60 s, the results processed using the author's approaches are clear and easy to compare. With a repeatability of sensor signals of 5%, the level of significant difference in the integral signals of the sensor array was taken to be 15%. A new method of color coding the results of piezoelectric quartz microweighing was used, according to which the samples are divided into groups by color marks, which allows quick comparison of the proximity and difference in the composition of volatile compounds of the samples without detailing the composition.

Keywords: product engineering, beer, efficiency, biotechnology, yeast, control, analysis, sensors, electronic nose

ВВЕДЕНИЕ

Выбор пивных дрожжей основывается на важных технологических свойствах: эффективности сбраживания сахара в сусле и флокуляции; снижении фенольного привкуса для светлых сортов пива [1]. Коммерческие штаммы дрожжей являются изолятами из среды, связанной с ферментацией, или получены в результате селекционных программ,

в ходе которых они отобраны по определенным фенотипическим признакам, таким как эффективное потребление азота, приятный ароматический профиль [1], быстрая скорость ферментации [2].

Производство крафтового пива в последние годы выросло, по этой причине исследования были сосредоточены на отборе дрожжей с хорошей кинетикой брожения, а также пива с лучшими ароматическими характеристиками.

Применение Kveik-дрожжей в пивоварении становится все более популярным среди пивоваров во всем мире из-за их уникальных свойств. Kveik-дрожжи могут придавать пиву фруктовые, цитрусовые ноты, а также другие интересные ароматы и вкусы. Они также способны быстро и очень эффективно газировать пиво, что ускоряет процесс производства [3].

Традиционные норвежские фермерские пивные дрожжи Kveik существенно отличаются от обычно используемых пивоваренных дрожжей [4]. Эти плохо охарактеризованные дрожжи добавляют в сусло при температуре в диапазоне 28–40 °С с последующим быстрым брожением в течение 1–2 дней. При этом дрожжи Kveik могут храниться в сушеном виде длительное время (до 1 года и более). Они гораздо более устойчивы к изменению температуры и содержанию этанола, требуют меньше времени на брожение, не содержат остатков диацетила и не требуют времени для созревания / лагеринга. Традиционные для светлого пива дрожжи *Saccharomyces pastorianus* требуют более низких температур для ферментации (10–15 °С), диацетилового остатка, более длительного брожения (до 10 дней) со сроком созревания 2–3 недели [5].

В настоящее время нет подробной информации о диапазоне температур брожения, при которых различные штаммы Kveik эффективно действуют. Указанные показатели накопления этанола и термотолерантности свидетельствуют о повышенной способности штаммов Kveik поддерживать брожение при более высоких температурах [6].

Дрожжи Kveik перспективны в качестве новой группы промышленных пивных дрожжей. Их добавление в технологический процесс влияет как на основные технологические параметры пива, так и на профиль соединений, влияющих на органолептические свойства напитка [7]. Для контроля их постоянства внутри группы необходимо применение затратных методов ПЦР-дактилоскопии, полногеномного секвенирования и фенотипического скрининга [8]. На практике такое сопровождение технологических процессов не проводится, ставятся эксперименты с контролем основных потребительских и технологических свойств продукта.

Конечный вкус и аромат пива обусловлены комбинацией сотен активных ароматических соединений, образующихся в основном во время брожения в результате метаболизма дрожжей (высшие спирты, сложные эфиры, альдегиды и вицинальные дикетоны). С применением газовой хроматографии в открытом пространстве (HSGC) изучено микробиологическое разнообразие десяти различных видов Kveik, установлены различия как в метаболитах, так и в сенсорных характеристиках продуктов при ферментации в разных температурных условиях [9]. Различия в профиле летучих соединений темного и светлого пива, ферментированного разными штаммами пивных дрожжей, изучены с

применением газовой хроматографии с пламенно-ионизационным и масс-спектрометрическим детекторами. Установлено, что преобладающей группой соединений во всех проанализированных сортах пива являются спирты (56.4–72.2 %), сложные эфиры (14.6–20.8 %), альдегиды (8.4–20.5 %), терпены и терпеноиды (1.2–6.6 %) и кетоны (0.42–1.0 %) [10].

Литературный обзор данных по изучению летучего профиля напитков при использовании новых видов штаммов дрожжей показал, что при производстве крафтовых напитков приоритетным является подбор штаммов с высокой стрессовой устойчивостью к температуре брожения и содержанию этанола в сусле. Совокупность применяемых методов анализа даже на стадии предварительных испытаний требует оптимизации, так как минимальный набор исследования предполагает применение спектроскопии, газовой хроматографии, органолептических испытаний.

Цель работы - применение быстрого сенсорного анализа равновесной газовой фазы над продуктами пивоварения для оценки процессов ферментативирования при производстве пива с Kveik-культурами дрожжей и пригодности их для формирования требуемых потребительских характеристик, прежде всего органолептических.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Брожение с экспериментальными и стандартными дрожжами проводили при разных температурах для поиска оптимальной.

В каждой контрольной точке и в конце брожения анализировали пробы пива методами газовой хроматографии и инструментальной оценки летучей фракции с применением системы искусственного обоняния.

1. Характеристика дрожжей и проб для анализа

В работе оценивали свойства штаммов Kveik-культуры дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Пробы пива готовили при разной температуре от 25 °С до 40 °С с применением двух видов культуральных дрожжей. Пробы **Стандарт** сбраживались классическими дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* штамм S23, Fermentis, Франция, пробы **Эксперимент** - дрожжами Kveik. С учетом условий брожения и хранения образцы маркировали. Стандарт 1 (первая партия производства при стандартной температуре 40 °С), Эксперимент 1 (первая партия производства при 40 °С); Стандарт 2 (вторая партия производства при температуре брожения 25 °С), Эксперимент 2 (вторая партия производства при температуре 25 °С); Эксперимент 3 (вторая партия производства при температуре 32 °С). Для оценки сохранности вкусо-ароматических свойств пробы хранили при температуре от 4 °С до 8 °С в непрозрачной упаковке, исключающей воздействие света. Колбы с плотно закрытыми крышками размещали в месте, где механические воздействия были минимальны.

Каждая ёмкость была промаркирована с указанием даты получения [11]. Пробы хранили в течение двух недель, после чего эксперимент по определению состава летучих соединений повторяли. При этом эти пробы маркировали дополнительной * соответственно: Стандарт 1* (брожение при 40 °С); Эксперимент 1* (40 °С); Эксперимент 2* (25 °С); Эксперимент 3* (32 °С).

2. Газовую хроматографию (ГХ) осуществляли по ГОСТ Р 52363–2005 [12] в испытательной лаборатории союза «Торгово-промышленная палата Воронежской области».

3. Интегральное детектирование летучих соединений (ЛС) в равновесной газовой фазе (РГФ) над образцами пива, сваренного на классических дрожжах и на дрожжах Kveik при разной температуре брожения проводили с применением анализатора газов «МАГ-8» (производство ООО «СНТ», Россия, рис. 1) с методологией электронный нос (ЭН) с возможностью оценки стабильности качественного состава смесей. В качестве измерительных элементов детектора применены сенсоры на основе пьезокварцевых резонаторов ОАВ-типа (генерация объемных акустических волн) с базовой частотой колебаний 10.0–14.0 МГц с разнохарактерными пленочными и наноструктурированным сорбентами на электродах [13, 14].

Массив сенсоров «Food®» сформирован из восьми сенсоров с покрытиями. Покрывания выбраны в соответствии с задачей испытаний (возможная эмиссия из проб органических соединений разной природы) с тонкими пленками: сенсор 1 – Поливинилпирролидон, ПВП; сенсор 2 – Прополис, пчелиный клей, ПчК; сенсор 3 – Дициклогексан-18-Краун-6, ДЦГ18К6; сенсор 4 – Наногидроксипатит, ГА; сенсор 5 – Полиэтиленгликоль ПЭГ-2000, ПЭГ-2000; сенсор 6 – Полиэтиленгликольсебацинат, ПЭГСб; сенсор 7 – Полиэтиленгликоль сукцинат, ПЭГС; сенсор 8 – Тритон X-100, TX100. Повторяемость сигналов сенсоров до 5 %.



Рис. 1. Общий вид анализатора «МАГ-8»

Fig. 1. General view of the “MAG-8” analyzer

Подготовка проб к анализу заключалась в термостабилизации 10.0 см³ пива при комнатной температуре (25±1 °С) в стеклянных закрытых пробоотборниках вместимостью 50.0 см³ не менее 30 мин. РГФ над пробой объемом $V_{\text{ргф}} = 3 \text{ см}^3$ отбирали через мембрану. Пробу переносили к прибору и инжесктировали в закрытую ячейку прибора. Отбор РГФ над пробами и инъекцию ее в ячейку детектирования проводили автоматическим пробоотборником, что обеспечивает высокую повторяемость отбора и снижает общую погрешность анализа. Общее время детектирования ЛС РГФ пробы – 60 с. При таком режиме к указанному времени в системе устанавливается равновесие, поэтому полученные результаты – изменение частот колебаний разных сенсоров в массиве, согласно теории пьезокварцевого микровзвешивания, соответствуют массе адсорбированных из около сенсорного пространства, а, значит, поступивших в составе РГФ выделяемых пробами летучих соединений.

Наиболее упрощенный вариант визуализации многомерного аналитического сигнала – круговая диаграмма максимальных откликов отдельных сенсоров («визуальные отпечатки» максимальных сигналов (максимумов)). Более сложный, но информативный сигнал строят с учетом кинетических особенностей сорбции (кинетические «визуальные отпечатки» сигналов сенсоров в определенное время нагрузки), если различия в составе аромата несущественные.

Особенностью анализатора газов «МАГ-8» и алгоритмов обработки данных по откликам пьезо-сенсоров, разработанных научной группой проф. Кучменко Т.А. (Воронеж), является возможность получения расширенной информации, чем принято в системах «электронный нос» по хеометрическим алгоритмам (методы главных компонент, проекций на латентные структуры и др.). Для описания состава сложных смесей ЛС по результатам анализа приборами искусственного обоняния и связи их с результатами ГХ применены авторские подходы для оценки интенсивности запаха, связанной с суммой концентраций ЛС, приоритетно сорбирующихся покрытиями сенсоров; оценки стабильности объекта по профилю качественного состава смесей соединений в РГФ над ним.

Количественные характеристики: S_{Σ} , Гц·с

– суммарная площадь «визуального отпечатка», построенного по всем сигналам всех сенсоров за полное время измерения – оценивает общую интенсивность запаха и пропорциональна концентрации легколетучих веществ; ΔF_{max} , Гц – максимальные сигналы сенсоров с наиболее активной или специфической пленками сорбентов – служат для оценки содержания отдельных классов органических соединений в РГФ методом нормировки [13, 15–17].

Качественные характеристики. Для распознавания в смеси отдельных классов соединений применен параметр идентификации A_{ij} , рассчитанный

по сигналам сенсоров в анализируемых образцах. Новым подходом в сравнении качественного состава РГФ проб или их части является сравнение не отдельных параметров A_{ij} , а *набора* наиболее стабильных и информативных (алгоритм «отпечатков пальцев»). Близость состава части регистрируемых летучих соединений проб оценивают по доле совпадающих в пределах погрешности из набора параметров [18, 19].

Пробы считали идентичными, с близким запахом в терминологии дегустаторов при различии не более 30 % параметров A_{ij} , характеризующих качественный состав РГФ.

Отклики сенсоров зафиксированы, обработаны и сопоставлены в программном обеспечении анализатора «MAG Soft».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Главная задача эксперимента с новыми видами дрожжей с точки зрения технологического превосходства над стандартными культурами заключалась в исследовании не только стрессовой температурной устойчивости, кинетики брожения, но, и приоритетно, влияния на формирование и сохранность положительных органолептических вкусовых и одорометрических (запаховых) дескрипторов.

Сравнение влияния типовой принадлежности дрожжей на формирования ЛС пива. Хроматографические исследования осуществляли на первом этапе эксперимента, чтобы оценить содержание ЛС в разных образцах пива и найти корреляцию с оценками сенсорной панели. Параллельно для объективизации оценок сенсорной панелью доминирующего потребительского показателя аромата (положительно оцениваемая приятная часть запаха), к которому, наряду со вкусом, завышено внимание при производстве, применяли объективный и чувствительный метод газового анализа с применением «электронного носа».

Априори ожидали, что пиво, ферментированное дрожжами типа Kveik (Эксперимент), будет иметь

различные концентрации многих идентифицированных летучих соединений по сравнению с контрольным образцом (применены стандартные дрожжи пивоварения). Так, ранее установлено, что в образцах пива с дрожжами Kveik разного фенотипа содержание ЛС различается [20]. Основные летучие соединения, идентифицированные в ходе ГХ исследования, включали спирты, сложные эфиры жирных кислот и этанола: этилацетат и гексанат; фенэтиловый спирт; 2-метилбутанол и 3-метилбутанол; 1-пропанол; этилоктаноат и деканоат. При этом набор ЛС не был универсальным, характерным для всех видов дрожжей. Дополнительно сенсорная панель выше оценила пиво, ферментированное дрожжами Kveik, из-за более интенсивного фруктового аромата [20].

По результатам ГХ установлено, что образцы пива, полученного с применением экспериментальных и стандартных культур в нашем исследовании, существенно отличаются по содержанию спиртов и ацетальдегида (табл. 1).

Меньшее содержание спиртов C_4-C_5 в пиве, полученном с экспериментальной культурой Kveik, положительно сказывается на потребительской оценке аромата, так как эти соединения имеют характерный ярко выраженный неприятный запах. Особенно позитивным является снижение содержания пентанола-2 в три раза, по сравнению с пивом, сброженным стандартными дрожжами. Полученные данные согласуются с ранее проведенными систематическими работами других исследователей [10, 20], что подтверждает правильность технологии применения экспериментальной культуры и их свойства.

Для оценки близости состава смеси ЛС в РГФ над всеми образцами пива проанализируем сигналы сенсоров «электронного носа» (табл. 2). Особенностью системы искусственного обоняния является то, что сенсоры характеризуются повышенным сродством к воде, этанолу, другим примесям, кроме тех, которые определяли по стандартной методике методом ГХ.

Таблица 1

Результаты хроматографического анализа образцов пива, полученных при 40 °С по ГОСТ Р 52363-2005

Table 1

Results of chromatographic analysis of beer samples obtained at 40 °C according to GOST R 52363-2005

Определяемые показатели, единицы измерения	Результаты испытаний с погрешностью/неопределенностью	
	Стандарт 1	Эксперимент 1
Массовая концентрация высших спиртов в пересчете на безводный спирт, г/дм ³ :	3.48 ± 0.52	1.29 ± 0.19
Пропанол-1	0.39 ± 0.06	0.24 ± 0.04
Бутанол-2	0.77 ± 0.12	0.26 ± 0.04
Пентанол-2	2.32 ± 0.35	0.79 ± 0.12
Массовая концентрация ацетальдегида в пересчете на безводный спирт, г/дм ³	0.43 ± 0.06	0.15 ± 0.02
Массовая концентрация диацетила в пересчете на безводный спирт, г/дм ³	менее 0.01 (нижний предел измерения)	менее 0.01 (нижний предел измерения)

Таблица 2

Отклики сенсоров (Гц) и площади «визуального отпечатка» максимальных сигналов сенсоров в парах РГФ над пробами пива, сброженного с разными культурами, при разной температуре, времени выдержки, $V_{ргф} = 3 \text{ см}^3$ за 60 с нагрузки

Table 2

Sensor responses (Hz) and the area of the “visual fingerprint” of the maximum sensor signals in pairs of RGF over samples of beer fermented with different cultures, at different temperatures, exposure time, $V_{rgf} = 3 \text{ cm}^3$ for 60 seconds of loading

Номер проб с указанием температуры и даты ска-нирования	S1 - ПВП	S2 - ПЧК	S3 - 18K6	S4 - ГА	S5 - ПЭГ ₂₀₀₀	S6 - ПЭГсб	S7 -ПЭГ-сук	S8 TX-100
Стандарт 1, 40 °С(партия 1)	62	61	40	18	35	17	11	25
Эксперимент 1 40 °С(партия 1)	57	60	37	19	38	16	10	28
Стандарт 2, 25 °С (партия 2)	73	55	64	9	26	16	10	24
Эксперимент 2, 25 °С(партия 2)	66	48	46	8	28	15	8	23
Эксперимент 3, 32 °С(партия 2)	88	55	59	10	34	16	11	26
После хранения в холодильнике								
Стандарт 1* 40 °С	29	50	37	30	34	13	12	25
Эксперимент 1* 40 °С	38	59	35	27	38	15	13	30
Эксперимент 2* 25 °С	35	53	36	32	33	12	12	30
Эксперимент 3* 32 °С	36	55	41	33	37	13	11	29

Исходной информацией системы искусственного обоняния являются значения максимальных сигналов отдельных сенсоров за 60 с нагрузки парами и интегрального отклика массива сенсоров в «электронном носе» – суммарная площадь под выходными кривыми всех сенсоров. Эта величина пропорциональна массе летучих соединений, которую сорбируют покрытия выбранного массива сенсоров за время нагрузки, является количественной характеристикой, которая определяется как природой, так и содержанием летучих соединений над пробами. В этом факте заключается принципиальное отличие интегрального аналитического сигнала приборов с методологией искусственного обоняния и хроматографии, других покомпонентных методов анализа. В табл. 2 представлены абсолютные отклики массива сенсоров для всех анализируемых проб пива. Установлено, что отклики сенсоров в РГФ над пробами Стандарт 1 и Эксперимент 1, полученных при 40 °С, коррелируют с результатами газовой хроматографии. Но интегральные количественные сигналы массива сенсоров не столь сильно отличаются для проб, как ожидалось по результатам ГХ, что соответствует принципу детектирования ЛС системами искусственного обоняния, фиксирующих большее число соединений. Но даже при таком различии в формировании аналитических сигналов в методе ГХ и пьезокварцевого микровзвешивания массивом сенсоров возможно спрогнозировать и

отследить изменение содержания более тяжелых и геометрически некомпактных молекул ЛС. При увеличении их содержания в пробе пива и в РГФ соответственно, интегральный количественный сигнал ЭН также увеличивается, что связано с изменением кинетики их сорбции, а значит, и изменением эффективности сорбции за фиксированное время измерения. Дополнительно оценивали относительное содержание основных классов ЛС в смеси с учетом преимущественной сорбции на покрытиях сенсоров в массиве методом нормировки (табл. 3). По этому методу суммировали площади под кривыми всех сенсоров в массиве, далее вклад каждого сенсора в суммарное значение оценивали по его доле $\omega = (S_i/S_{\Sigma}) \cdot 100, \%$. Аналогично расчетам в ГХ, метод нормировки сигналов отдельных сенсоров ЭН позволяет оценить природу и относительное содержание в РГФ сорбируемых соединений с учетом избирательности покрытий (табл. 3). Такой подход не является абсолютным, поскольку в системах искусственного обоняния не проводится предварительного разделения ЛС и какой-либо подготовки или обработки проб. Поэтому, строго говоря, оцениваются и сопоставляются между собой те компоненты в РГФ, которые регистрируются установленным набором сенсоров. Для проб Стандарт 1 и Эксперимент 1 выделены сенсоры, вклад которых в общий сигнал коррелирует с уменьшением доли спиртов - сенсоры 1 и 7. Для других проб по доле сигналов этих сенсо-

Таблица 3

Относительное содержание компонентов в пробах по значимым сигналам сенсоров, ω ($\pm 0.3-3.0$) % масс. в РФГ над пробами

Table 3

Relative content of components in samples according to significant sensor signals, ω ($\pm 0.3-3.0$) wt. % in RGF above the samples

Пробы	Относительное содержание компонентов в пробах по значимым сигналам сенсоров, ω ($\pm 0.3-3.0$) %, и классы веществ, сорбируемые покрытиями							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
	Вода, все полярные соединения	Спирты, альдегиды, амины	Органические полярные соединения, кислоты	Все полярные, амины	Кетоны, спирты	Амины, другие N-содержащие соединения	Среднеполярные, S-, N-содержащие соединения	Полярные соединения
	1 группа	2 группа	3 группа	4 группа	5 группа			
Стандарт 1, 40 °C	23.1	22.7	14.9	6.70	13.0	6.,32	4.09	9.29
Эксперимент 1 40 °C	21.5**	22.6	14.0	7.17	14.3	6.04	3.77	10.6
Стандарт 2, 25 °C	26.4	19.9	23.1	3.25	9.39	5.78	3.61	8.66
Эксперимент 2, 25 °C	27.3	19.8	19.0	3.31	11.6	6.20	3.31	9.50
Эксперимент 3, 32 °C	29.4	18.4	19.7	3.34	11.4	5.35	3.68	8.70
После хранения в холодильнике								
Стандарт 1*	12.6	21.7	16.1	13.0	14.8	5.65	5.22	10.9
Эксперимент 1*	14.4	21.8	14.8	13.2	13.6	4.94	4.94	12.4
Эксперимент 2*	14.1	21.6	16.1	12.94	14.5	5.10	4.31	11.4
Эксперимент 3*	14.9	23.1	13.7	10.6	14.9	5.88	5.10	11.8

** - выделены значимые различия ω для однотипных групп соединений в РФГ над пробами, которые отличают их от соответствующего Стандарта.

ров в массиве (ω , %), также можно прогнозировать изменение содержания спиртов. По данным табл. 3 прослеживается зависимость ω для сенсоров 1 и 7 от параметров эксперимента, что в грубом приближении позволяет объективизировать и существенно упростить прогноз изменений аромата пива при инжиниринге продукта и подборе условий производства. При изменении условий пивоварения по сигналам этих сенсоров прогнозируется смещение содержания спиртов, существенно влияющих на органолептические свойства проб пива.

Установлены разные отклики сенсоров в парах РФГ над пробами свежеприготовленными и после хранения их в холодильнике. При этом пробы хранились в рекомендованных условиях и сроках. Различия их объясняются высокой чувствительностью системы искусственного обоняния именно к летучим соединениям. Перераспределение, изменение концентрации отдельных, особенно с большей массой соединений за счет разных естественных процессов, фиксируется сенсорами, но не отмечается дегустаторами из-за смешанной органолептической оценки вкуса и аромата. Применение систем искусственного обоняния для оценки выживаемости

ЛС, формирующих аромат, более эффективно по сравнению с органолептикой.

Влияние температуры на состав РФГ.

Учитывая большой интерес к применяемым экспериментальным дрожжам в пивоварении, важной является оценка их температурной стрессоустойчивости. Для изучения влияния этого фактора пиво сбраживали при разной температуре и оценивали изменение состава РФГ над пробами готового продукта. Интегральные отклики массива сенсоров в парах РФГ над пробами существенно отличаются, особенно сильно различие для свежеприготовленных проб и после хранения в холодильнике (рис. 2).

Температура значительно влияет на формирование летучего профиля образцов: для второй партии при температуре 25 °C получен образец пива Эксперимент с обедненным составом РФГ, брожение при 40 °C приводит к большему обогащению летучими веществами РФГ. Но для экспериментального образца 1 брожение при температуре 40 °C не привело к росту насыщенности РФГ относительно Стандарта 1 и даже Стандарта 2, полученного при более низкой температуре. Это подтверждает температурную устойчивость исследуемых дрожжей по сравнению

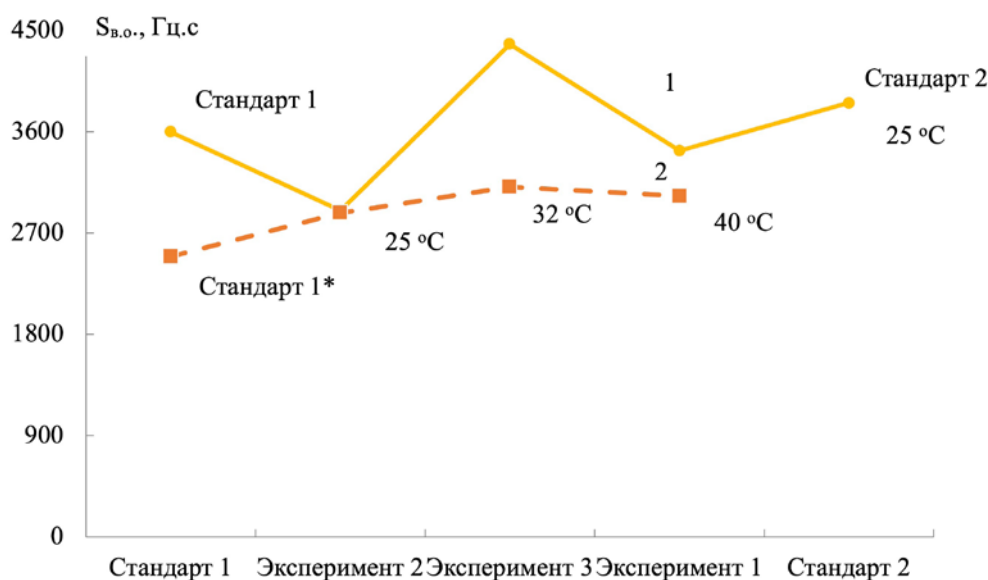


Рис. 2. Изменение интенсивности аромата проб пива до (1) и после хранения (2), сброженных при разных температурах
Fig. 2. Change in the flavor intensity of beer samples fermented at different temperatures before (1) and after (2) storage

со стандартными. Для свежеприготовленных проб установлена значимая зависимость состава РГФ от температуры брожения. При этом максимальное содержание ЛС в РГФ характерно для проб, полученных при 32 °C. Но хранение больше влияет на состав РГФ именно этой пробы и Стандарта 1. В то время, как проба Эксперимент 1, полученная при 40 °C, после хранения сохраняет постоянным состав РГФ лучше остальных. По сравнению с исходными образцами, после хранения состав РГФ проб, сброженных при разной температуре, меняется не одинаково. Чтобы сравнить изменение содержания ЛС в РГФ над пробами, оценим относительные изменения суммарной характеристики S_{Σ} , Гц.с (рис. 2). Для пробы Стандарт 1 установлено

уменьшение содержания ЛС на 30 %. Примем это изменение относительного содержания ЛС в РГФ за условную границу. Относительно этого значения будем оценивать изменения количественного показателя для других проб. Проба Эксперимент 1 (40 °C) уменьшила интенсивность аромата на 12 %, что с учетом повторяемости сигналов не является значимым изменением. Проба Эксперимент 2 (25 °C) не изменилась в процессе хранения, при этом и насыщенность РГФ среди остальных экспериментальных проб у нее минимальная. Проба Эксперимент 3 (32 °C) потеряла при хранении столько же ЛС, как проба Стандарт 1 (около 30 %).

Изменения состава РГФ показывают, что дрожжи Kveik позволяют проводить сбраживание

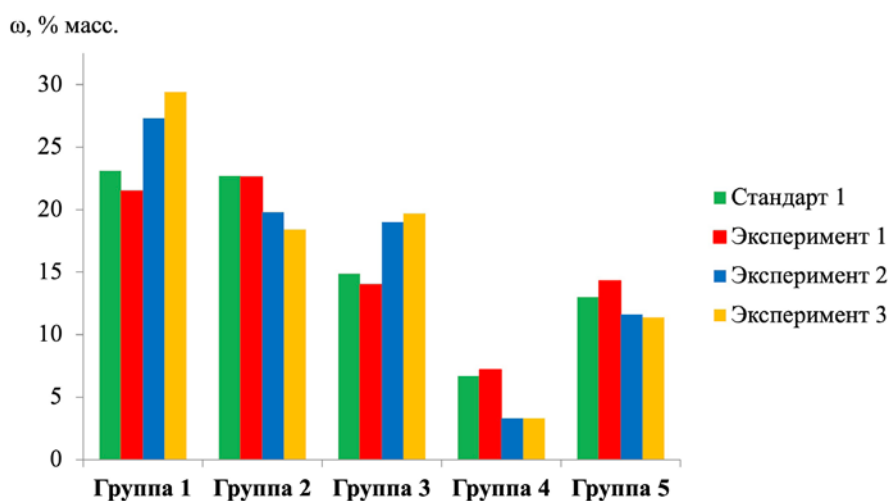


Рис. 3. Распределение основных групп соединений (табл. 3) в равновесной газовой фазе над пробами пива, сброженного при разной температуре и с разными дрожжами
Fig. 3. Distribution of the main groups of compounds (Table 3) in the equilibrium gas phase over samples of beer fermented at different temperatures and with different yeasts

при более высокой температуре, соответственно быстрее, с достижением стабильного при хранении ярко выраженного аромата продукта.

Эти результаты согласуются с установленными ранее для разных штаммов Kveik особенностями брожения при высоких температурах [10]. А с помощью газовой хроматографии в открытом пространстве (HSGC) установлены различия как в метаболитах, так и в сенсорных характеристиках между культурами, когда ферментация проводилась при разных температурах [19]. Результаты наших исследований также позволяют оценить влияние температуры на состав летучей фракции пива по составу РГФ, что подтверждает и доказывает применимость и информативность систем искусственного обоняния для подобных исследований.

На примере первых пяти проб (не хранящихся в холодильнике) для двух партий продемонстрируем наглядно близость и отличия содержания основных групп соединений (указано в табл. 3) в виде диаграмм (рис. 3).

Установлено, что для первой партии состав РГФ Стандарта 1 и экспериментального образца 1 близок и отличается от второй партии. Для второй партии пробы Эксперимент 2 и 3 имеют более близкий состав РГФ друг к другу, отличаясь от пробы Стандарт 2. Для проб Эксперимент 2 и 3 отмечается меньшее содержание кислот, но большее кетонов, спиртов, альдегидов. В установленных особенностях также проявляется более резкое влияние температуры при сбраживании стандартными организмами по сравнению с экспериментальной культурой.

Для выборки проб после хранения по набору основных классов соединений к Стандарту 1* ближе проба Эксперимент 2*, а больше отличается проба Эксперимент 3*. Изменения связаны с уменьшением содержания кислот, аминов и накоплением альдегидов, спиртов. Эти условные распределения

по классам при оценке состава РГФ над пробами пива с помощью ЭН не дают более точных оценок, чем ГХ, но закономерности изменения состава оцениваются этим методом верно. Так, согласно исследованию с применением ГХ восьми сортов пива на разных дрожжах показан доминирующий состав летучих соединений пива, создающийся приоритетно спиртами, сложными эфирами, альдегидами, терпенами и терпеноидами, кетонами [10]. Среди спиртов преобладают 2-метилпропан-1-ол, 3-метилбутанол, феноэтиловый спирт, среди альдегидов - фурфурол, деканал, нонанал, а среди сложных эфиров - этилацетат, феноэтилацетат и изоамилацетат. Различия в общем содержании летучих веществ в пиве, ферментированном разными штаммами дрожжей, в основном обусловлены выявленными сложными эфирами и спиртами [10].

Несмотря на селективность хроматографического анализа, такие исследования весьма длительные и дорогостоящие. Наши исследования показывают, что на отдельных этапах инжиниринга пива с новыми заквасками быстрый и чувствительный метод анализа с применением систем искусственного обоняния вполне оправдан и информативен. Кроме того, аналитические сигналы ЭН более наглядны и просты для сравнения результатов и требуют меньшей квалификации персонала для понимания изменений аромата при варьировании условий брожения. Продемонстрируем визуализацию данных ЭН для проб пива.

Для прогнозирования изменений состава РГФ над пробами пива достаточно сравнить интегральные многомерные сигналы массива всех сенсоров – «визуальные отпечатки» откликов сенсоров за 60 с нагрузки парами проб, сопоставив геометрию их фигур в программном обеспечении прибора (рис. 4). Для отдельных проб в одном масштабе сопоставлены фигуры круговых диаграмм сигналов сенсоров,

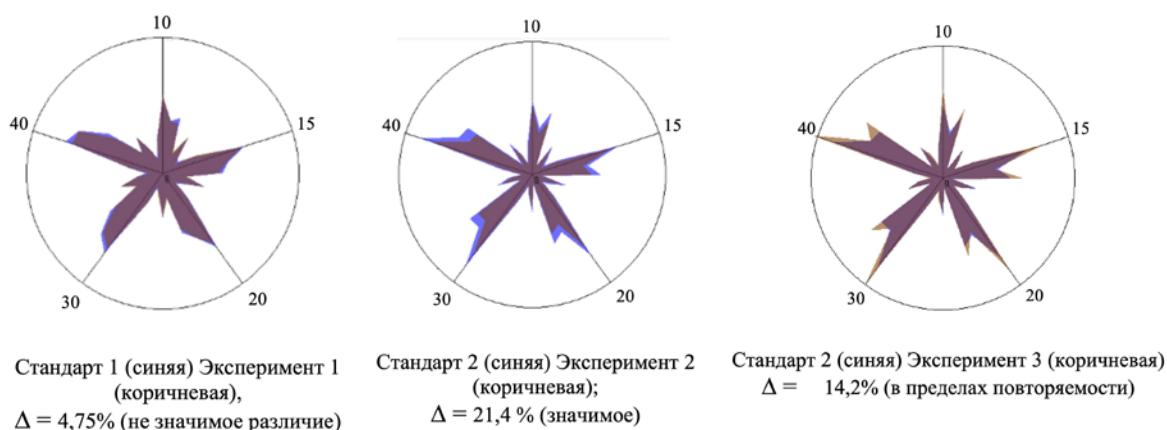


Рис. 4. Кинетические круговые диаграммы сигналов сенсоров «электронного носа» в парах РГФ над пробами и их сравнение по относительной разности площадей фигур Δ , %. По осям с номерами сенсоров (по кругу) отложены сигналы сенсоров в конкретные моменты времени

Fig. 4. Kinetic pie charts of the signals of the sensors of the “electronic nose” in pairs of RGF over the samples and their comparison by the relative difference in the areas of the figures Δ , %. Sensor signals at specific time points are plotted along the axes with sensor numbers (in a circle)

чтобы отразить изменения как качественного (форма), так и количественного (площадь) состава смеси летучих соединений, диффундирующих из проб. Наиболее информативными являются кинетические «визуальные отпечатки». Относительные различия значений площадей фигур, которые однозначно подтверждают изменение состава РГФ, а значит, и органолептической оценки ее дегустаторами и потребителями, сопоставлены с учетом повторяемости. Для применяемого алгоритма нагрузки и природы покрытий сенсоров повторяемость сигналов составляет $c_v = 5\%$. С учетом этого приняли, что надежное различие интегральных сигналов, связанное с изменением состава РГФ, констатируется на уровне $3c_v = 15\%$. При сравнении «визуальных отпечатков» сигналов сенсоров в РГФ для проб пива Стандарт 1 и Эксперимент 1, сваренных при 40°C , также наблюдается минимальное различие в значении интегральных сигналов. То есть самый простой аналитический сигнал массива сенсоров адекватно отражает тенденцию изменений в составе РГФ над образцами пива, и для этого не требуются хемометрические алгоритмы.

Более детально проследить изменения в качественном составе РГФ над пробами и появление/исчезновение соединений в легколетучей фракции проб позволяет набор параметров A_{ij} , показывающий постоянство соотношения концентраций отдельных классов легколетучих соединений в РГФ. Если наборы параметров A_{ij} , которые в максимальной степени отражают стабильность состава запаха, для сравниваемых проб близки или совпадают, то можно считать, что соотношение содержания в пробах указанных групп соединений одинаково. Для представленных образцов из 28 неповторяющихся параметров A_{ij} выделено пятнадцать, стабильных и значимо различающихся для проб. Это отражает разный состав смесей летучих органических соединений для всех проб. Все пробы Эксперимент по

качественному составу РГФ отличаются от соответствующей пробы контроля Стандарт, но по-разному.

Чем больше число параметров A_{ij} для проб, отличающихся от контроля или друг друга, тем существеннее отличия в качественном составе проб, которые могут фиксироваться при органолептической оценке потребителем и дегустаторами. Если значимо изменяются более чем 40 % параметров, то в запахе проб происходят существенные изменения качественного состава – появляются или исчезают группы летучих веществ и потребители меняют привычное отношение к напитку.

Для визуализации вывода о различиях или похожести качественного состава запаха проб представим набор качественных параметров A_{ij} , которые максимально различаются для проб с учетом варибельности параметра, в виде круговых диаграмм (рис. 5). Для каждой группы проб сформируем круговые диаграммы семи выделенных параметров отдельно. По качественному составу пробы в выборке 1 отличаются незначительно (рис. 5). Проба Эксперимент 1 отличается от пробы Стандарт 1 по набору разных групп соединений на 20 %. В выборке 2 от Стандарта 2 отличаются пробы: Эксперимент 2 – на 25 %; Эксперимент 3 – на 30 %. Т. е. температура в меньшей степени влияет на качественный состав РГФ, чем природа применяемых дрожжей.

В соответствии с этими результатами в большей степени при органолептической оценке дегустаторами будут выделены пробы Эксперимент 3 и Эксперимент 1*, относительно соответствующих стандартов проб свежей и после хранения (Стандарт 1 и Стандарт 1*). Т. е. низкие температуры брожения не рекомендуются и для экспериментальных дрожжей, а 32°C – лучшая температура для приготовления свежего, но не хранящегося долго напитка.

Третьим подходом сопоставления состава равновесных газовых фаз над пробами пива (близости ЛС) является нахождение корреляции наборов

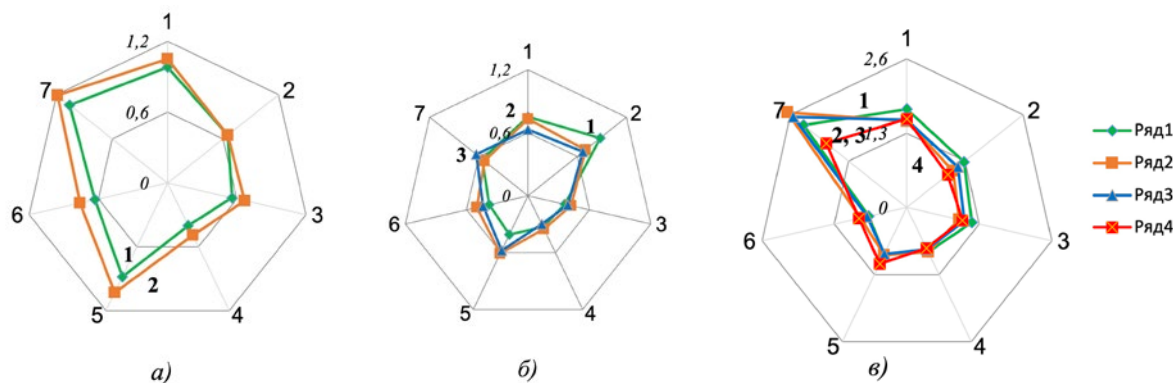


Рис. 5. Круговые диаграммы семи качественных параметров A_{ij} для выборок проб: а) Ряд 1- Стандарт 1, Ряд 2 – Эксперимент-2; б) Ряд 1- Стандарт 2, Ряд 2 – Эксперимент 2, Ряд 3 – Эксперимент 3; в) Ряд 1 – Стандарт 1*; Ряд 2 – Эксперимент 2*, Ряд 3 – Эксперимент 3*, Ряд 4 – Эксперимент 1*

Fig. 5. Pie charts of qualitative parameters A_{ij} for samples: а) Row 1 – Standard 1, Row 2 – Experiment 2; б) Row 1 – Standard 2, Row 2 – Experiment 2, Row 3 – Experiment 3; в) Row 1 – Standard 1*; Row 2 – Experiment 2*, Row 3 – Experiment 3*, Row 4 – Experiment 1*

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Пирсона для набора параметров качественного состава РГФ над изученными пробами

Table 4

Pearson correlation coefficients for a set of parameters of the qualitative composition of the RGF over the studied samples

Пробы	Коэффициенты корреляции Пирсона	
	Относительно пробы Стандарт 1	Относительно пробы Стандарт 2
Эксперимент 1	0.977	0.483
Стандарт 2	0.588	-
Эксперимент 2	0.704	0.949
Эксперимент 3	0.691	0.959
Стандарт 1*	0.775	0.380
Эксперимент 1*	0.878	0.346
Эксперимент 2*	0.761	0.284
Эксперимент 3*	0.780	0.353
После хранения, относительно пробы Стандарт 1*		
Эксперимент 1*	0.940	
Эксперимент 2*	0.958	
Эксперимент 3*	0.984	

параметров A_{ij} , для всех проб пива Эксперимент относительно проб Стандарт 1, 2 и для проб после хранения относительно пробы Стандарт 1* (табл. 4). Численно описывается коэффициентом Пирсона (онлайн калькулятор <https://planetcalc.ru/527/#>). Коэффициент Пирсона стремится к нулю, если множества мало коррелируют между собой, что отражает разный качественный состав РГФ. Коэффициент Пирсона стремится к единице, если множества совпадают. Соответственно, чем больше коэффициент Пирсона, тем ближе качественный состав РГФ проб Эксперимент и соответствующий Стандарт.

Установлено, что минимально отличается от пробы Стандарт 1 проба Эксперимент 1, сваренная в этот же день. Температура варки мало влияет на состав РГФ проб, сваренных с экспериментальными дрожжами. Пробы после хранения минимально близки всем пробам Стандарт до хранения и очень близки к пробе Стандарт 1*. Это подтверждает существенные изменения в составе РГФ над всеми пробами при хранении в холодильнике в течение двух недель. При этом в меньшей степени отличается от стандарта проба пива, сваренная при 32 °С. И этим подходом обработки данных установлено, что от пробы Стандарт 1 минимально отличается проба Эксперимент 1. Пробы Стандарт 2, Эксперимент 2 и 3, полученные при более низких температурах, примерно в равной степени иные, чем пробы Стандарт 1 и Эксперимент 1, полученные при 40 °С. База аналитических сигналов «электронного носа» позволяет представлять результаты измерения и сравнения проб в гораздо более вариативно, чем другие методы анализа. Это

Таблица 5

Результаты цветового кодирования данных для проб пива

Table 5

Results of color coding of beer sample data

Пробы	Суммарная цветовая метка	R	G	B
Стандарт 1		144	191	52
Эксперимент 1		148	177	36
Стандарт 2		61	166	117
Эксперимент 2		83	173	133
Эксперимент 3		77	182	117
После хранения в холодильнике				
Стандарт 1*		174	96	48
Эксперимент 2*		191	75	41
Эксперимент 3*		184	102	42
Эксперимент 1*		168	135	15

является ценной характеристикой при разработке портативного программного обеспечения и работы в режиме «на месте» во внелабораторных условиях (цеха, приемные пункты розлива в торговой сети).

Цветометрическая оценка качественного и количественного состава РГФ

Для суммарного сопоставления отличий всех проб по сигналам ЭН применен новый метод обработки многомерных данных – цветокодирование результатов пьезокварцевого микровзвешивания (проф. Кучменко Т.А.) [21]. Сущность метода заключается в получении точечных результатов (сжатие в одну цветовую точку) всего набора качественных характеристик состава летучей фракции пива. Каждому значению присваивается определенный цвет в зависимости от значения параметра. Далее все цвета суммируются и получается одна цветовая метка с координатами в системе RGB (для примера). Чем ближе цвета, присвоенные данным для проб, тем ближе реакция набора газовых сенсоров на состав РГФ над ними. По методу цветокодирования данных ЭН пробы разбились на несколько групп (табл. 5, рис. 6): первая группа организована метками для проб 1 (Стандарт 1), 2 (Эксперимент 1); вторая – метками для проб 3 (Стандарт 2), 4 – (Эксперимент 2), 5 (Эксперимент 3); третья – для проб 6 (Стандарт 1*), 7 (Эксперимент 2*), 8 (Эксперимент 3*); четвертая включает метку для пробы 9 (Эксперимент 1*). По пространственному расположению цветовых меток состава РГФ на плоскости быстро оценивается близость и отличие аромата проб свежих и после хранения (рис. 6).

Цветовое кодирование многомерных данных позволяет оценить смещение аромата при изменении технологии и сроков хранения при изготовлении новых видов пива и существенно упрощает стадию обработки многомерных данных без потери важной при инжиниринге продуктов информации об изменении летучего профиля продукта.

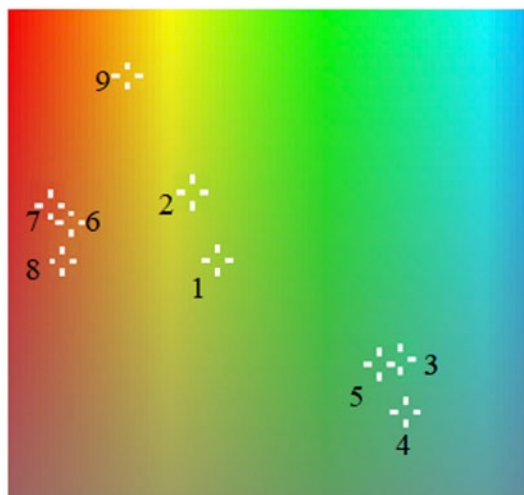


Рис. 6. Распределение цветowych меток для проб РГФ пива: 1 (Стандарт 1), 2 (Эксперимент 1); 3 (Стандарт 2), 4 (Эксперимент 2), 5 (Эксперимент 3); 6 (Стандарт 1*), 7 (Эксперимент 2*), 8 (Эксперимент 3*); 9 (Эксперимент 1*)

Fig. 6. Distribution of color marks for samples of RGF beer: 1 (Standard 1), 2 (Experiment 1); 3 (Standard 2), 4 (Experiment 2), 5 (Experiment 3); 6 (Standard 1*), 7 (Experiment 2*), 8 (Experiment 3*); 9 (Experiment 1*)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка инновационных и более экономичных способов производства пива в процессе непрерывной ферментации остаётся сложной задачей, которая заслуживает серьёзного изучения. Для аналитической химии является определённым вызовом быстрое получение нужной информации в процессе инжиниринга новой продукции. При этом разные сенсорные оценки образцов дегустаторами оцениваются не одинаково трудозатратно. Так, имеющая наибольшую потребительскую оценку и важность характеристика пива – аромат – оценивается наиболее сложно и длительно. В этом направлении анализа применение аналитических систем нового поколения, интегрирующих подходы биообоняния и газоанализаторов, показывает очевидное преимущество в простоте, доступности, времени анализа с сохранением достаточной информативности, по сравнению с традиционно применяемыми.

Система искусственного обоняния на основе массива пьезосенсоров позволила оценить особенности формирования и изменения состава ЛС пива, полученного на стандартных и экспериментальных дрожжах.

С точки зрения стабильности состава ЛС пива при хранении экспериментальные дрожжи существенно превосходят стандартные. Низкая температура брожения не позволяет сформироваться насыщенному и полному набору смеси ЛС, в то время как высокие температуры брожения (40 °C) позволяют получить более стабильный состав ЛС

пива. Промежуточная температура обеспечивает наиболее насыщенный, но не стабильный состав РГФ.

Результаты наших исследований также позволяют оценить влияние температуры на состав летучей фракции аромата, что подтверждает и доказывает применимость и информативность систем искусственного обоняния для подобных исследований. Установлено также, что температура брожения в меньшей степени влияет на аромат, чем природа применяемых дрожжей.

На отдельных этапах инжиниринга пива с новыми заквасками применение быстрого и чувствительного метода анализа с системой искусственного обоняния вполне оправдано и является информативным. Кроме того, новые подходы обработки аналитических сигналов пьезосенсоров более наглядны и просты для сравнения результатов при рутинном анализе, легко алгоритмируются и программируются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benuchchi I., Cecchi T., Lombardelli C., Maresca D., Mauriello G., Esti M. New yeast in microcapsules for primary fermentation of green beer: kinetic properties, volatile compounds, and sensory profile. *Food Chem.* 2021. V. 340. Article 127900.
2. Strains obtained on *Saccharomyces cerevisiae* starter cultures and their potential for farmhouse ale preparation / Catalo M., Nikulin Ya. [et al.]. [Электронный ресурс]: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.608> (дата обращения: 10.02.2024).
3. Barret F. Traditional Norwegian KVEIK yeast for brewing new beer types using the example of foreign extra stout // *Biomolecules.* 2021. [Электронный ресурс]: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.07.26.453768v1.abstract> (дата обращения: 10.02.2024).
4. Preiss R., Tyrawa K. Traditional Norwegian Kveik: A genetically distinct group of domesticated *Saccharomyces cerevisiae* brewing yeasts. [Электронный ресурс]: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.02137/full> (дата обращения: 10.02.2024).
5. Khreptovich K., Sternitskaya M.K., Kovalska P.D., Mezheevskaya J. Screening yeast for the production of 2-phenylethanol (rose aroma) in organic waste-based media // *Lett. Appl. Microbiol.* 2018. V. 66. P. 153.
6. Huang K.-J., Lu M.-Y., Chang Y.-V., Lee V.H. Experimental evolution of yeast for high-temperature tolerance // *Mol. Biol. Evol.* 2018. V. 35. P. 1823-1839.
7. Holt S., Mix M.H., de Carvalho B.T., Fulke-Moreno M.R., Tevelein J.M. Molecular biology of fruity and floral aromas in beer and other alcoholic beverages // *FEMS Microbiol. Rev.* 2019. V. 43. P. 193-22.
8. Gasinski A., Kawa-Rygielska J., Mikulski D., Klosowski G., Glawatzki A. Application of white grape pomace in brewing technology and its influence on ester and alcohol concentrations, physicochemical parameters, and antioxidant properties of beer // *Food Chem.* 2022. V. 367. Article 130646.
9. Aasen N.M. Growth, metabolism, and brewing with kveik. [Электронный ресурс]: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmliui/handle/11250/2681970> (дата обращения: 10.02.2024).
10. Todd I. Evaluation of stress tolerance and fermentation performance of traditional Norwegian landrace (Kveik) yeast. [Электронный ресурс]: <http://eprints.nottingham.ac.uk/72087/> (дата обращения: 10.02.2024).

11. ГОСТ 31495-2021. Пиво специальное. Общие технические условия (с Поправками ред. от 02.01.2024). М.: Стандартинформ, 2021. 18 с.
12. ГОСТ Р 52363-2005. Группа Н79. Национальный стандарт Российской Федерации. Спиртосодержащие отходы спиртового и ликёро-водочного производства. Газохроматографический метод определения содержания летучих органических примесей. М.: Стандартинформ, 2006. 43 с.
13. Kuchmenko T.A. Electronic nose based on nanoweights, expectation and reality // *Pure Appl. Chem.* 2016. V. 89. P. 1587–1601.
14. Kuchmenko T.A., Lvova L.B. A perspective on recent advances in piezoelectric chemical sensors for environmental monitoring and foodstuffs analysis // *Chemosensors*. 2019. V. 7, № 3. P. 39–45.
15. Kuchmenko T., Umarchanov R., Lvova L. E-nose for the monitoring of plastics catalytic degradation through the released volatile organic compounds (vocs) detection // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. V. 322. Article 128585.
16. Кучменко Т. А., Умарханов Р. У., Менжулина Д. А. Биогидроксипатит – новая фаза для селективного микровзвешивания паров органических соединений – маркеров воспаления в носовой слизи телят и человека Сообщение 1. Сорбция в модельных системах. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21, № 2. С. 142-152.
17. Кучменко Т. А., Умарханов Р. У., Менжулина Д. А. Биогидроксипатит – новая фаза для селективного микровзвешивания паров-маркеров воспаления в носовой слизи телят и человека Сообщение 2. Анализ реальных объектов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21, №2. С. 216-224.
18. Кучменко Т. А., Умарханов Р. У. Особенности микровзвешивания следовых содержаний алкиламинов на полимерных и твердотельных тонких пленках // *Ж. аналит. химии*. 2013. Т. 68, № 4. С. 397-397.
19. Kuchmenko T., Lvova L. Chemosensitive materials: Smart materials for chemical and biological stimulation. Chapter 16. Piezoelectric chemosensors and multisensory systems. P. 567-603. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/eb-ook/978-1-83916-277-0>.
20. Adamenko K., Pietrzak Z., Passat J., Glowacki A., Gasinski A., Leszczynski P. Potential of traditional Norwegian KVEIK yeast for brewing new beer types using the example of foreign extra stout / Kawa-Rygielska J. [ed al.] // *Biomolecules*. 2021. [Электронный ресурс]: <https://www.mdpi.com/2218-273X/11/12/1778> (дата обращения: 10.02.2024).
21. Кучменко Т.А., Умарханов Р.У., Звягина О.В. Разработка множественных аналитических меток для летучих органических соединений на основе сорбции на квантовых точках CdS в хитозане // *Аналитика и контроль*. 2023. Т. 27, № 3. С. 129–140.

REFERENCES

1. Benuchchi I., Cecchi T., Lombardelli C., Maresca D., Mauriello G., Esti M. New yeast in microcapsules for primary fermentation of green beer: kinetic properties, volatile compounds, and sensory profile. *Food Chem*, 2021, vol. 340, article 127900.
2. Catalo M., Nikulin Ya. [et al.]. Strains obtained on *Saccharomyces cerevisiae* starter cultures and their potential for farmhouse ale preparation Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.608> (accessed: 10.02.2024).

3. Barret F. Traditional Norwegian KVEIK yeast for brewing new beer types using the example of foreign extra stout. *Biomolecules*, 2021. Available at: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2021.07.26.453768v1.abstract> (accessed: 10.02.2024).
4. Preiss R., Tyrawa K. Traditional Norwegian Kveik: A genetically distinct group of domesticated *Saccharomyces cerevisiae* brewing yeasts Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.02137/full> (accessed: 10.02.2024).
5. Khreptovich K., Sternitskaya M.K., Kovalska P.D., Mezheevska J. Screening yeast for the production of 2-phenylethanol (rose aroma) in organic waste-based media. *Lett. Appl. Microbiol.*, 2018, vol. 66, pp. 153.
6. Huang K.-J., Lu M.-Y., Chang Y.-V., Lee V.H. Experimental evolution of yeast for high-temperature tolerance. *Mol. Biol. Evol.*, 2018, vol. 35, pp. 1823-1839.
7. Holt S., Mix M.H., de Carvalho B.T., Fulke-Moreno M.R., Tevelein J.M. Molecular biology of fruity and floral aromas in beer and other alcoholic beverages. *FEMS Microbiol. Rev.*, 2019, vol. 43, pp. 193-222.
8. Gasinski A., Kawa-Rygielska J., Mikulski D., Klosowski G., Glawatzki A. Application of white grape pomace in brewing technology and its influence on ester and alcohol concentrations, physicochemical parameters, and antioxidant properties of beer. *Food Chem.*, 2022, vol. 367, Article 130646.
9. Aasen N.M. Growth, metabolism, and brewing with kveik. Available at: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2681970> (accessed: 10.02.2024).
10. Todd I. Evaluation of stress tolerance and fermentation performance of traditional Norwegian landrace (Kveik) yeast. Available at: <http://eprints.nottingham.ac.uk/72087/> (accessed: 10.02.2024).
11. ГОСТ 31495-2021. Пиво специальное. Общие технические условия (с Поправками ред. от 02.01.2024). [State Standard 31495-2021. The beer is special. General Technical Conditions (as Amended) dated 01.02.2024)]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 18p. (in Russian).
12. ГОСТ Р 52363-2005. Группа Н79. Национальный стандарт Российской Федерации. Спиртосодержащие отходы спиртового и ликёро-водочного производства. Газохроматографический метод определения содержания летучих органических примесей [State Standard R 52363-2005. Group N79. National standard of the Russian Federation. Alcohol-containing waste of alcohol and liqueur production. Gas chromatographic method for determining the content of volatile organic impurities]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 43 p. (in Russian).
13. Kuchmenko T.A. Electronic nose based on nanoweights, expectation and reality. *Pure Appl. Chem.*, 2016, V. 89, pp. 1587-1601. doi: [org/10.1515/pac-2016-1108](https://doi.org/10.1515/pac-2016-1108).
14. Kuchmenko T.A., Lvova L.B. A perspective on recent advances in piezoelectric chemical sensors for environmental monitoring and foodstuffs analysis // *Chemosensors*. 2019. V. 7. № 3. P. 39–45. DOI: [10.3390/chemosensors7030039](https://doi.org/10.3390/chemosensors7030039).
15. Kuchmenko T., Umarchanov R., Lvova L. E-nose for the monitoring of plastics catalytic degradation through the released volatile organic compounds (vocs) detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, vol. 322. article 128585. doi: [10.1016/j.snb.2020.128585](https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128585).
16. Kuchmenko T. A., Umarchanov, R. U., Menzhulina D. A. [Biohydroxyapatite is a new phase for selective microbalancing of vapors of organic compounds, markers of inflammation, in the nasal mucus of calves and humans Message 1. Sorption in model systems] *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssessy [Sorption and Chromatographic Processes]*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 142-152. doi: [10.17308/sorpchrom.2021.21/3348](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3348) (in Russian).

17. Kuchmenko T. A., Umarkhanov, R. U., Menzhulina D. A. [Biohydroxyapatite is a new phase for selective microsuspension of vapors-markers of inflammation in the nasal mucus of calves and humans Message 2. Analysis of real objects]. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protsessy [Sorption and Chromatographic Processes]*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 216-224. doi: 10.17308/sorpchrom.2021.21/3355 (in Russian).
18. Kuchmenko T.A., Umarkhanov R.U. [Peculiarities of Microweighing of Trace Quantities of Alkylamines On Polymer And Solid-State Thin Films]. *Zh. analit. khimii. [J. Anal. Chem.]*, 2013. vol. 68. no. 4. pp. 397-397 (in Russian).
19. Kuchmenko T., Lvova L. Chemoresponsive materials: Smart materials for chemical and biological stimulation. Chapter 16. Piezoelectric chemosensors and multisensory systems. P. 567–603. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/eb-ook/978-1-83916-277-0>.
20. Kawa-Rygielska J., Adamenko K., Pietrzak Z., Passat J., Glowacki A., Gasinski A., Leszczynski P. Potential of traditional Norwegian KVEIK yeast for brewing new beer types using the example of foreign extra stout. *Biomolecules*, 2021. Available at: <https://www.mdpi.com/2218-273X/11/12/1778> (accessed: 10.02.2024).
21. Kuchmenko T.A., Umarhanov R.U., Zvyagina O.V. [Development of multiple analytical labels for volatile organic compounds based on the results of sorption on CdS quantum dots in chitosan without and with modification with Rhodamine 6G] *Analytika i Kontrol' [Analytics and Control]*, 2023. V. 27. № 3. P. 129-140. doi: 10.15826/analitika.2023.27.3.001 (in Russian).