

**4.3.5 – БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ
И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
(БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

DOI 10.53980/24131997_2023_4_25

И.С. Черепанов, канд. хим. наук, доц., e-mail: cherchem@mail.ru

Д.А. Тарасова, ассистент, e-mail: dashatarasova20@mail.ru

А.И. Егорова, ассистент, e-mail: alinaegorova@mail.ru

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск

УДК 664.144

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-ГРУППОВОГО СОСТАВА
ПРОДУКТА СОПИГМЕНТАЦИИ L-АСКОРБИНОВОЙ КИСЛОТЫ И D-ГЛЮКОЗЫ
В УСЛОВИЯХ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СТРЕССА**

В настоящее время одним из приоритетных направлений инновационного развития является получение продуктов с новыми потребительскими свойствами, в связи с чем разработка составов пищевых колеров с оптимизированными параметрами на основе биологически активных природных соединений представляется перспективной. В настоящей работе изучены структурно-групповой состав продукта совместной карамелизации (сопигментации) L-аскорбиновой кислоты и D-глюкозы и его изменение в условиях окислительного стресса. Окислительная стабильность и функциональный состав синтезированного карамельного продукта исследованы методами элементного анализа и колебательной спектроскопии. Показано, что в ходе эксперимента существенной окислительной трансформации и фотохимической деструкции структуры не происходит, вероятно, вследствие устойчивости первичной структуры, а также возможности таутомерного перехода между оксолактонным хромофором и α -пироновой формой, стабилизированной внутримолекулярными связями. Дополнительно установлено отсутствие в составе выделенных продуктов потенциально опасных низко- и высокомолекулярных производных фуранов. Развитие настоящего исследования предполагается в направлении экспериментальной оценки биоактивности изученного продукта.

Ключевые слова: аскорбиновая кислота, глюкоза, карамелизация, сопигментация, структурно-групповой состав, спектроскопия, окислительный стресс.

I.S. Cherepanov, Cand. Sc. Chemistry, Assoc. Prof.

D.A. Tarasova, Assistant Lecturer

A.I. Egorova, Assistant Lecturer

**EVALUATION OF THE STRUCTURAL COMPOSITION CHANGE
OF THE CO-PIGMENTATION PRODUCT
OF L-ASCORBIC ACID AND D-GLUCOSE UNDER OXIDATIVE STRESS**

Currently, one of the priority directions of innovative development is obtaining products with new consumer properties, in this regard, the development of food coloring compositions with optimized parameters on the basis of biologically active natural compounds seems promising. The present paper has studied structural and group composition of product of joint caramelization (co-pigmentation) of L-ascorbic acid and D-glucose and its change under oxidative stress conditions. Oxidative stability and functional composition of synthesized caramel product have been investigated by methods of elemental analysis and oscillating spectroscopy.

The experiment showed no significant oxidative transformation and photo-chemical destruction of the structure. The reason for it probably the stabilization of primary structure, as well as the possibility of tautomeric transition between oxo-lactone chromophore and α -pyrone form, stabilized by the intermolecular bonding. The experiment additionally established absence of potentially dangerous low- and high-molecular furan

derivatives in the composition of isolated products. The authors expect to develop the research in the direction of experimental estimation of the synthesized product bioactivity.

Key words: *ascorbic acid, glucose, caramelization, co-pigmentation, structural-function composition, spectroscopy, oxidative stress.*

Введение

Широкое распространение карамельных колеров в пищевой индустрии предполагает непрерывное совершенствование технологии их получения, поскольку наряду с общеизвестными достоинствами углеводные карамели обладают рядом недостатков, таких как жесткие условия получения [1], сложность технологического оформления процессов [2], а также образование потенциально токсичных продуктов [3], в частности азотистых гетероциклов ряда имидазолов [2]. К настоящему времени показано, что основными потенциально опасными являются низкомолекулярные вещества (производные фурана) в составе продуктов карамелизации [4], что предполагает необходимость их нивелирования посредством смягчения температурного режима синтеза либо их последующего удаления [5]. Натуральные пищевые красители безопасны, при этом существует проблема их низкой светостойкости вследствие окисления по кратным C=C-связям [6], что приводит к потере функциональности.

В настоящее время описаны различные способы стабилизации пищевых красителей в составе технологических сред, один из последних обзоров по данной тематике [7] классифицирует методы повышения устойчивости на несколько групп, в частности выделяются группы методов оптимизации экспериментальных условий и методов химической модификации структуры пигментов.

Первая группа методов предполагает варьирование внешних и внутренних параметров пищевых систем, в частности кислотности, температуры, а также оптимизацию условий хранения после выделения из природных систем, в том числе с применением глубоких эвтектических растворителей.

Во втором случае возможна модификация посредством химических реакций, в частности ацилирования и гликозилирования енольных фрагментов природных полифенолов, кроме того, описано формирование комплексов флавоноидов с аминокислотами и пептидами, образование соединений включения в системах антоцианы – циклодекстрин, а также комплексообразование порфириновых красителей с ионами металлов.

Одним из наиболее функциональных подходов является сопигментация, предполагающая ковалентное или нековалентное взаимодействие стабилизируемого красителя с сопигментом; в этом случае, помимо стабилизации, дополнительно увеличивается протяженность хромофоров. Ранее нами была разработана методика получения карамельного колерного состава на основе *L*-аскорбиновой кислоты в системе с *D*-глюкозой [8], предполагающая низкотемпературное взаимодействие компонентов с последующим выделением целевого продукта в форме водно-этанольного раствора для возможности его применения в качестве красителя в карамельной массе [6]. Оценка хроматических параметров последнего показала их соответствие количественным характеристикам углеводных карамелей и близость к таковым для коммерческих продуктов, указывая на перспективность дальнейших исследований.

Цель работы – изучение структурно-группового состава продукта совместной карамелизации (сопигментации) *L*-аскорбиновой кислоты и *D*-глюкозы и его изменения в условиях окислительного стресса.

Материалы и методы исследования

Получение целевого продукта проводили по ранее предложенной методике [8] посредством первичной термоактивации в 40%-ном этаноле (50 °С; 1,5 ч) с последующим выдерживанием растворов (25 °С) до стабилизации спектральных параметров. Полученный продукт в виде масла желто-коричневого цвета анализировали непосредственно после выделения из водно-этанольной среды, а затем после выдерживания на воздухе при 25±2 °С при дневном

освещении в течение 90 сут [9]. Колебательные спектры поглощения регистрировали на ИК-Фурье спектрометре «ФСМ-2201» (ООО «Инфраспек», СПб), образцы готовили и исследовали в форме тонких пленок на CaF_2 и KBr -подложках (интервал волновых чисел $4000\text{--}860(\text{CaF}_2)/400(\text{KBr})\text{ см}^{-1}$, разрешение по волновому числу 2 см^{-1} при 60 циклах накопления). Вторые производные спектральных интервалов были получены в результате численного дифференцирования в окнах до 15 точек при сглаживании полиномом 4-го порядка. Обработку спектров проводили в программе FSpec 4.3.0.9, интенсивность пиков оценивали по методу базовой линии (спектры нулевого порядка) и по разности амплитуд сигналов (спектры второго порядка). Элементный анализ твердых фаз на содержание углерода (С, %) и водорода (Н, %) проводили на CHNS-анализаторе Vario MICRO Cube (Elemental Analyzer GmbH, Германия), содержание кислорода оценивали по разности $100-(\text{C}, \% + \text{H}, \%)$. Параметры окрашивания продуктов определяли по методикам [8] на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ «Спектр», СПб.).

Результаты исследования и их обсуждение

Ранее нами [8] и другими авторами [6] для оценки сохраняемости свойств колеров применялся спектрофотометрический метод исследования, предполагающий анализ динамики изменения оптической плотности растворов. В настоящей работе оценку изменения структуры в условиях окислительного стресса проводили сравнительным анализом данных колебательной спектроскопии и элементного анализа. Установленный ранее структурно-групповой состав полученной карамели характеризуется интенсивными ИК-полосами около 1630 и 1730 см^{-1} , относимые к валентным колебаниям кратных $\text{C}=\text{C}$ -связей в составе сопряженных систем и $\text{C}=\text{O}$ -связей δ -лактонного цикла [8]. Окисление сложных органических веществ O -окислителями протекает по наиболее активным реакционным центрам субстратов, что сопровождается образованием $\text{C}=\text{O}$ -функций в различном структурном окружении. В колебательных спектрах последнее регистрируется, кроме прочего, как усиление интегральной интенсивности ИК-сигналов в области около $1720\text{--}1730\text{ см}^{-1}$, что относят к $\nu_{\text{C}=\text{O}}$ с алифатическими заместителями [10]. Представленные на рисунке 1 спектры исследованных систем показывают близость спектральных профилей, что может свидетельствовать о несущественном изменении структурно-группового состава в ходе окислительного стресса.

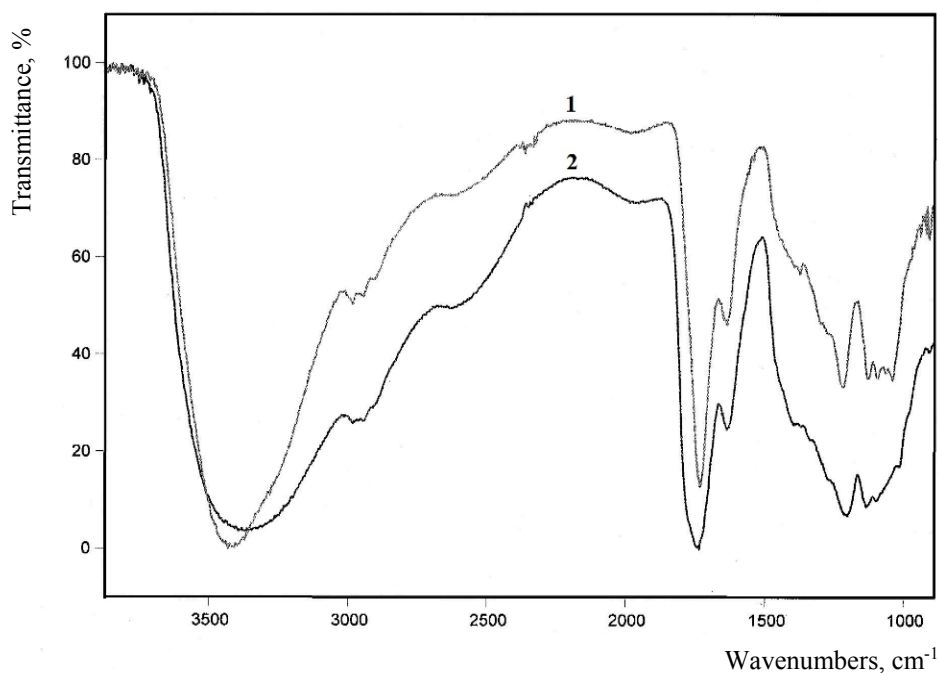


Рисунок 1 – Колебательные спектры (тонкая пленка) синтезированного продукта непосредственно после выделения (1) и по окончании окислительного стресса (2)

Следует отдельно отметить постоянство интенсивности полосы при 1630 см^{-1} ($\nu_{C=C}$), в то же время фиксируется уширение полосы 1730 см^{-1} на высокочастотном крыле, а также группы полос валентных колебаний ОН-групп ($3500\text{--}3000\text{ см}^{-1}$). Данный эффект может быть обусловлен дополнительным межмолекулярным взаимодействием карбонильных функций с другими группами [11]. Данные элементного анализа также подтверждают постоянство структурно-группового состава и сохранение параметров окрашивания (табл. 1).

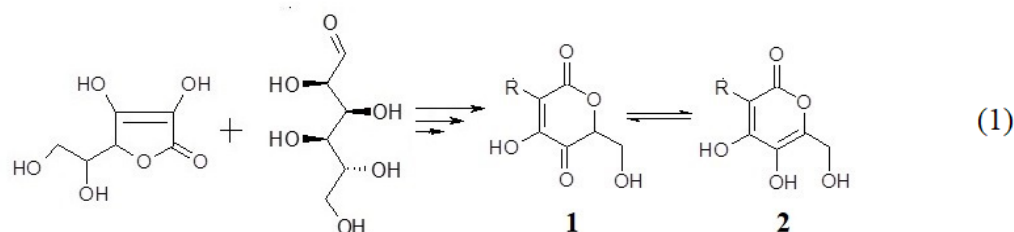
Таблица 1

Характеристики элементного состава и параметры окрашивания продуктов сопигментации до и после окислительного стресса

Продукт	Элементный состав			
	С, %	Н, %	О, %	CI (EBC unit)
Непосредственно после выделения	49,20	3,40	47,40	15689
После окислительного стресса	49,79	3,75	46,46	16204

Известно [9], что окисление углеводов карамелей реализуется по кратным связям, что снижает протяженность сопряженных систем и приводит к снижению интенсивности окраски в целом. Данные таблицы 1 указывают на некоторое увеличение значений CI (EBC unit), пропорциональные поглощению в видимой области [8], что свидетельствует об отсутствии критической деструкции сопряженных систем.

Относительная устойчивость конденсированной фазы на воздухе, вероятно, связана с возможностью таутомеризации, приводящей к равновесию оксолактонной **1** и α -пироновой структур **2** [8,13]:



Последнее подтверждается наличием в спектрах второй производной (рис. 2) полос 1720 , 1700 и 1567 см^{-1} ($\nu_{C=O}$, $C=C$), характерных для гидроксиметил-2H-пиран-2-онов [13–15]. Число и соотношение интенсивностей полос в области $1730\text{--}1700\text{ см}^{-1}$, вероятно, связаны в том числе с проявлением резонанса Ферми [16]. Сигнал 1615 см^{-1} в спектре 2 подтверждает наличие 5-гидрокси-2-пираноновых фрагментов [17].

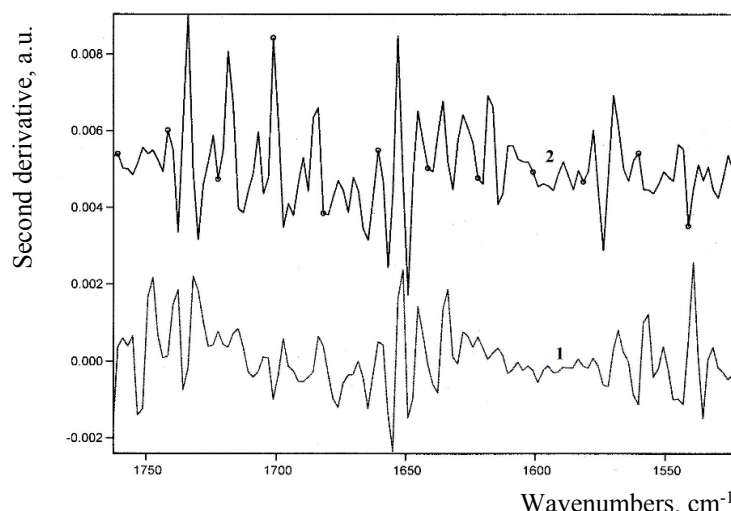
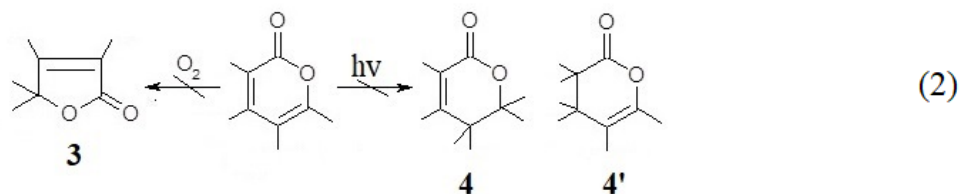


Рисунок 2 – Вторые производные колебательных спектров синтезированного продукта непосредственно после выделения (1) и по окончании окислительного стресса (2)

Можно предположить, что образующиеся структуры **2** дополнительно стабилизированы внутримолекулярными водородными связями, на образование которых указывает наличие усиливающихся полос около 2750 и 2000 см⁻¹ (см. рис. 1), относимых к сложным колебаниям –ОН...О с участием фенольных структур [12].

Описанное авторами [18] окисление (O₂, 20 °С) полностью замещенных пиран-2-онов в свободно аэрируемых средах до α-, β-бутенолидов **3**, вероятно, реализуется для низкомолекулярных субстратов с донорными заместителями в положении 6.



В спектре **2** (см. рис. 2) характерный для продуктов окисления **3** ИК-дублет при 1750–1760 + 1780 см⁻¹ [19] не регистрируется, что указывает на отсутствие протекания описанной в [18] окислительной перегруппировки. Авторы [20], изучая антиокислительную активность сложных молекул, содержащих α-пироновые фрагменты, указывают на незначительный вклад подобных структур в восстановительную способность антиоксидантов.

Исследование [21] подтверждает стабильность α-пироновых фрагментов структуры в отношении фотохимических реакций: реализуемое в этом случае присоединение по одной из кратных С=С-связей должно приводить к продуктам **4** и **4'**. Протяженность сопряженных систем на основном хромофоре в этом случае должна снижаться, вызывая понижение значений общего индекса окрашивания CI (EBC unit), чего, согласно данным таблицы 1, не наблюдается.

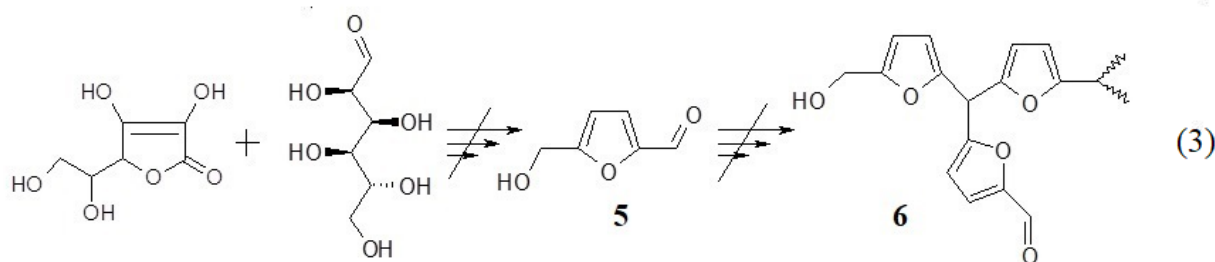
Ранее было показано [8], что лактонный хромофор дополнительно стабилизируется сопряженным R-фрагментом в положении 3, природа которого не выяснена. Сопоставление низкочастотной области спектров (ниже 1600 см⁻¹) с профилями спектров веществ фуранового ряда карамелизованных углеводов [22] показывает отсутствие последних в структуре полученных продуктов (табл. 2): наиболее характерные для фуранов полосы С=С и =С-Н-колебаний в спектрах исследуемых составов не фиксируются.

Таблица 2

Сопоставление спектральных характеристик исследованных карамелей с параметрами фурановых производных

Максимумы поглощения (ν, см ⁻¹) основных полос в спектрах	
исследуемые системы [8]	производные фурана [22]
–	1500–1480 (С=С)
1390–1380 (С-С-О, С-Н)	1380–1370 (С-Н)
1210–1206 (С-О)	1240–1230 (С-О)
1140–1133 (С-О-С)	1170–1150 (С-О, С-О-С)
1060–1015 (С-ОН)	1030–1010 (=С-Н _{пл} , -СН-ОН)
–	880–860 (=С-Н _{внпл})

Таким образом, можно констатировать отсутствие как низкомолекулярных **5**, так и конденсированных фурановых производных **6** при взаимодействии исходных компонентов в процессе сопигментации L-аскорбиновой кислоты и D-глюкозы:



3-R-заместитель в структуре **2**, вероятно, представляет собой ациклический фрагмент, на начальном этапе встраиваемый в структуру оксолактонного хромофора посредством присоединения по Михаэлю к аскорбат-аниону производного трансформированного углевода [23]. Вероятно, что первичный продукт присоединения вступает в дальнейшие реакции конденсации и дегидратации, формируя сопряженную систему связей $-C=C-(C)_n-C(=O)-$ ($n \geq 0$). Данный вывод подтверждается известными литературными данными [8]: в спектрах замещенных гидроксипиран-2-онов, фиксируя интенсивные полосы в области $1640-1620 \text{ см}^{-1}$; последнее объясняет достаточно высокую интенсивность полос 1630 см^{-1} (см. рис. 1), являющихся, по-видимому, составными, что подтверждается спектрами второго порядка (см. рис. 2).

Анализ литературных данных [17, 24, 25] указывает на проявление пиронсодержащими структурами различных видов биоактивности, в частности рострегулирующих свойств, антимикробной, противогрибковой и противоопухолевой активности, что предполагает перспективность изучения систем в данном направлении.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Продукт сопигментации *L*-аскобиновой кислоты и *D*-глюкозы показал достаточную стабильность свойств в условиях действия свободно-аэрируемой среды, что подтвердилось данными молекулярной спектроскопии и элементного анализа.
2. Данные колебательной спектроскопии позволили детализировать структурно-групповой состав продуктов до и после окислительного стресса, подтверждая наличие в системе нескольких типов стабильных хромофоров.
3. Дополнительно показано отсутствие в составе выделенных продуктов потенциально опасных производных фурана, что отличает их от карамельных составов на основе углеводов.
4. Проявление различных видов биоактивности аналогичными по функционально-групповому составу производными предполагает перспективность дальнейших исследований в направлении изучения структурно-зависимых свойств синтезированных продуктов.

Библиография

1. Al-Abid M., Al-Shoaily K., Al-Amry M. et al. Preparation of caramel colour from dates // Acta Horticulturae. – 2007. – N 736. – P. 537–541.
2. Hong S.-M., Park M., Lee K.-G. Development of caramel colour with improved colour stability and reduced 4-methylimidazole // Food Additives & Contaminants – Part A. Chemistry. – 2020. – N 1 (37). – P. 1–8.
3. Jacobson M. Carcinogenicity and regulation of caramel colorings // Int. J. Occup. Environ. Health. – 2012. – N 3 (18). – P. 254–259.
4. Buczkowska M., Paciorek K., Kapcinska A. et al. Caramel colors in term of scientific research, with particular consideration of their toxicity // Postery Hig Med Dosw. – 2021. – N 1 (75). – P. 246–254.
5. Guan Y.-G., Shi W.-H., Yu S.-J. et al. Ultrafiltration of caramel color solution reduces 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde // J. Membrane Sci. – 2011. – N 1 (380). – P. 9–12.
6. Дерканосова Н.М., Гинс В.К., Лупанова О.А. и др. Разработка способов получения и применения натурального пищевого красителя // Техника и технология пищевых производств. – 2015. – № 1. – С. 18–23.
7. Nedamani A. Stability enhancement of natural food colorants – a review // Journal of Research and Innovation in Food Sciences and Technology. – 2022. – N 4 (10). – P. 369–388.

8. Черепанов И.С. Формирование цветности карамельных составов на основе аскорбиновой кислоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: пищевые и биотехнологии. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 77–85.
9. Savel J., Kosin P., Broz A. Anaerobic and aerobic beer aging // Czech. J. Food Sci. – 2010. – N 1 (28). – P. 18–26.
10. Мамлеева Н.А., Харланов А.Н., Лунин В.В. Особенности деструкции лигнина в древесине под действием озона // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94, № 9. – С. 1337–1342.
11. Kampouraki Z., Giannakoudakis D., Triantafyllidis K. et al. Catalytic oxidative desulfurization of a 4,6-DMDBT containing model fuel by metal-free activated carbons: the key role of surface chemistry // Green Chem. – 2019. – N 21. – P. 6685–6698.
12. Rusinska-Roznak D. Energy of intramolecular hydrogen bonding in *ortho*-hydroxybenzaldehydes, phenones and quinones. Transfer of aromaticity from *ipso*-benzene ring to the enol system(s) // Molecules. – 2017. – Vol. 22. – 481 p.
13. Djinni D., Defant A., Kecha M. et al. Antibacterial polyketides from the marine alga-derived endophilic *Streptomyces sundarbansensis*: a study of hydroxypyronone tautomerism // Mar. Drugs. – 2013. – N 1 (11). – P. 124–135.
14. Barroso-Bogeat A., Alexandre-Franco M., Fernandez-Gonzalez C. et al. FT-IR analysis of pyrone and chromene structures in activated carbon // Energy Fuels. – 2014. – N 6 (28). – P. 4096–4103.
15. Ganguly A., Govindachari T., Mohamed P. Structure of opuntiol, a constituent of *Opuntia elatior* // Tetrahedron. – 1965. – N 1 (21). – P. 93–99.
16. Thul P., Gupta V., Ram V. et al. Structural and spectroscopic studies on 2-pyroneones // Spectrochim. Acta. Part A. Mol. Biomol. Spectr. – 2010. – N 2 (75). – P. 251–260.
17. Lin A., Lu X., Fang Y. et al. Two new 5-hydroxy-2-pyrone derivatives isolated from a marine-derived Fungus *Aspergillus Flavus* // J. Antibiot. – 2008. – N 4 (61). – P. 245–249.
18. Eade S., Adlington R., Cowley A. et al. A novel oxidative rearrangement of 6-metoxypyran-2-ones // Org. Lett. – 2005. – N 17 (7). – P. 3705–3707.
19. Joshi V., Chamoli R. Synthesis of new α , β -unsaturated butenolides // Bull. Chem. Soc. Ethiop. – 2010. – N 3 (24). – P. 467–471.
20. Rosa A., Deiana M., Atzeri A. et al. Evaluation of the antioxidant and cytotoxic activity of arzanol, a prenylated α -pyrone–phloroglucinol etherodimer from *Helichrysum italicum* subsp. *Microphyllum* // Chemico-biological Interaction. – 2007. – N 1 (165). – P. 117–126.
21. Zuidema D., Jones P. Triplet photosensitization in cyercene A and related pyrones // J. Photochem. Photobiol. – 2006. – N 1 (83). – P. 137–145.
22. Ghosh M., Howard M., Dussan K. et al. Mechanism and theory of *D*-glucopyranose homogeneous acid catalysis in the aqueous solution phase // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2019. – N 32 (21). – P. 1–19.
23. Черепанов И.С., Мухдарова Э.Ш. Изучение влияния *D*-глюкозы на процессы деструкции *L*-аскорбиновой кислоты в водно-этанольных средах // Вестник МГТУ. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 248–258.
24. Bach T., Kirsch S. Synthesis of 6-substituted 4-hydroxy-2-pyroneones from aldehydes by addition of an acetoacetate equivalent, Dess-Martin oxidation and subsequent cyclization // Synlett. – 2001. – N 12. – P. 1974–1976.
25. Доржиева В.В., Ханхалаева И.А., Бутуева Э.Б. и др. Исследование качества и безопасности производства комбинированного мясoproдукта с использованием барьерной технологии и принципов ХАССП // Вестник ВСГУТУ. – 2019. – № 4 (75). – С. 32–39.

Bibliography

1. Al-Abid M., Al-Shoaily K., Al-Amry M. et al. Preparation of caramel colour from dates // Acta Horticulturae. – 2007. – N 736. – P. 537–541.
2. Hong S.-M., Park M., Lee K.-G. Development of caramel colour with improved colour stability and reduced 4-methylimidazole // Food Additives & Contaminants – Part A. Chemistry. – 2020. – N 37 (1). – P. 1–8.
3. Jacobson M. Carcinogenicity and regulation of caramel colorings // The International Journal of Occupational and Environmental Health. – 2012. – N 18 (3). – P. 254–259.
4. Buczkowska M., Paciorek K., Kapcinska A. et al. Caramel colors in term of scientific research, with particular consideration of their toxicity // Postępy Higieny i Medycyny Doswiadczalnej. – 2021. – N 75. – P. 246–254.

5. Guan Y.-G., Shi W.-H., Yu S.-J. et al. Ultrafiltration of caramel color solution reduces 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde // *Journal of Membrane Science*. – 2011. – N 1 (380). – P. 9–12.
6. Derkanosova N.M., Gins V.K., Lupanova O.A et al. Development of production methods and application of natural food coloring // *Food Processing: Techniques and Technologies*. – 2015. – N 1. – P. 18–23.
7. Nedamani A. Stability enhancement of natural food colorants – a review // *Journal of Research and Innovation in Food Sciences and Technology*. – 2022. – N 4 (10). – P. 369–388.
8. Cherepanov I.S. Color formation during caramelization in ascorbic acid basic system // *Bulletin of the South Ural State University. Food and Biotechnology*. – 2023. – N 1 (11). – P. 77–85.
9. Savel J., Kosin P., Broz A. Anaerobic and aerobic beer aging // *Czech Journal of Food Sciences*. – 2010. – N 1 (28). – P. 18–26.
10. Mamleeva N.A., Charlanov A.N., Lunin V.V. Features of lignin destruction in wood under action of ozone // *Russian Journal of Physical Chemistry*. – 2020. – N 9 (94). – P. 1337–1342.
11. Kampouraki Z., Giannakoudakis D., Triantafyllidis K. et al. Catalytic oxidative desulfurization of a 4,6-DMDBT containing model fuel by metal-free activated carbons: the key role of surface chemistry // *Green Chemistry* – 2019. – N 21. – P. 6685–6698.
12. Rusinska-Roznak D. Energy of intramolecular hydrogen bonding in *ortho*-hydroxybenzaldehydes, phenones and quinones. Transfer of aromaticity from *ipso*-benzene ring to the enol system(s) // *Molecules*. – 2017. – Vol. 22. – P.481.
13. Djinni D., Defant A., Kecha M. et al. Antibacterial polyketides from the marine alga-derived endophilic *Streptomyces sundarbansensis*: a study of hydroxypyronone tautomerism // *Marine Drugs*. – 2013. – N 1 (11). – P. 124–135.
14. Barroso-Bogeat A., Alexandre-Franco M., Fernandez-Gonzalez C. et al. FT-IR analysis of pyrone and chromene structures in activated carbon // *Energy Fuels*. – 2014. – N 28 (6). – P. 4096–4103.
15. Ganguly A., Govindachari T., Mohamed P. Structure of opuntiol, a constituent of *Opuntia elatior* // *Tetrahedron*. – 1965. – N 1 (21). – P. 93–99.
16. Thul P., Gupta V., Ram V. et al. Structural and spectroscopic studies on 2-pyrانونes // *Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2010. – N 2 (75). – P. 251–260.
17. Lin A., Lu X., Fang Y. et al. Two new 5-hydroxy-2-pyrانونe derivatives isolated from a marine-derived Fungus *Aspergillus Flavus* // *Journal of Antibiotics*. – 2008. – N 4 (61). – P. 245–249.
18. Eade S., Adlington R., Cowley A. et al. A novel oxidative rearrangement of 6-metoxypyran-2-ones // *Organic Letters*. – 2005. – N 17 (7). – P. 3705–3707.
19. Joshi V., Chamoli R. Synthesis of new α,β -unsaturated butenolides // *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*. – 2010. – N 3 (24). – P. 467–471.
20. Rosa A., Deiana M., Atzeri A. et al. Evaluation of the antioxidant and cytotoxic activity of arzanol, a prenylated α -pyrone–phloroglucinol etherodimer from *Helichrysum italicum* subsp. *Microphyllum* // *Chemico-biological Interaction*. – 2007. – N 1 (165). – P. 117–126.
21. Zuidema D., Jones P. Triplet photosensitization in cyercene A and related pyrones // *Journal of Photochemistry and Photobiology*. – 2006. – N 1 (83). – P. 137–145.
22. Ghosh M., Howard M., Dussan K. et al. Mechanism and theory of *D*-glucopyranose homogeneous acid catalysis in the aqueous solution phase // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2019. – N 21 (32). – P. 1–19.
23. Cherepanov I.S., Mukhdarova E.Sh. Study of *D*-glucose influence on ascorbic acid destruction in aqueous-ethanolic media // *Vestnik of MSTU*. – 2022. – N 3 (25). – P. 248–258.
24. Bach T., Kirsch S. Synthesis of 6-substituted 4-hydroxy-2-pyrانونes from aldehydes by addition of an acetoacetate equivalent, Dess-Martin oxidation and subsequent cyclization // *Synlett journal* – 2001. – N 12. – P. 1974–1976.
25. Dorzhieva V.V., Khankhalaeva I.A., Bitueva E.B. et al. Research of quality and safety of production of combined meat products using barrier technology and HASSP principles // *Bulletin of the ESSTUM*. – 2019. – N 4 (75). – P. 32–39.