



Научная статья

05.18.15 – Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания (технические науки)

УДК 665.328

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.016

 EDN: QMMGAT

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА

Евгения Владимировна Кравцова ¹, Александр Геннадьевич Новоселов ²,
Александр Юрьевич Кузнецов ³, Юлия Николаевна Гуляева ⁴

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия;

⁴ НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) ВАМТОРоссия, Санкт-Петербург

¹ evkravtcova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000000313933347>

² agnovoselov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000000211685362>

³ sasha_2731@mail.ru, <https://orcid.org/0000000299539203>

⁴ gulyaeva.yul@yandex.ru, <https://orcid.org/0000000157732315>

Аннотация. Технология промышленного производства пива представляет собой цепочку, логически связанных между собой физических и биохимических процессов, направленных на трансформацию полисахаридов, содержащихся в солодовом сырье, в моно- и дисахариды, которые необходимы для последующих процессов брожения, а также для выращивания засеваемых дрожжей. Представлено обоснование необходимости изучения этих процессов с помощью методов системного подхода. В статье, на базе трехуровневого системного подхода, рассматривается влияние гранулометрического состава измельченного солодового сырья на вязкостные свойства водно-солодовых растворов. Отмечается, что размер частиц измельченного солода существенно влияет на изменение динамической вязкости водно-солодовых растворов в процессе проведения водно-тепловой ферментативной обработки (ВТФО). Показано, что при проведении стадии ВТФО с водно-солодовыми суспензиями, составленными из частиц измельченного солода со средним диаметром 1 мм, после начала клейстеризации нативного крахмала, значение динамической вязкости резко возрастает в несколько раз. Констатируется, что комплексных исследований такого рода ранее не производилось. Полученные результаты, позволят определить оптимальный средний диаметр частиц измельченного солода, идущего на составление гидромодуля, уточнить кинетику проведения процесса ВТФО, и уменьшить энергозатраты на его проведение.

Ключевые слова. Многофазные среды, многокомпонентные среды, аппарат, затирание, суспензия, гидромодуль, гидродинамические процессы, тепловые процессы, массообменные процессы, водорастворимые углеводы, вязкость.

Для цитирования: Анализ процессов и аппаратов, реализующих технологические стадии производства пива / А. Г. Новоселов [и др.]. // Ползуновский вестник. 2022. № 3. С. 117 – 122. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.016, EDN: <https://elibrary.ru/QMMGAT>.

Original article

ANALYSIS OF PROCESSES AND DEVICES IMPLEMENTING THE TECHNOLOGICAL STAGES OF BEER PRODUCTION

Evgenia V. Kravtsova ¹, Alexander G. Novoselov ²,
Alexander Yu. Kuznetsov ³, Yulia N. Gulyaeva ⁴

^{1,2,3} ITMO University, St. Petersburg, Russia;

⁴ NII (VSI MTO RF Armed Forces) VAMTO Russia, St. Petersburg

¹ evkravtsova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000000313933347>

² agnovoselov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000000211685362>

³ sasha_2731@mail.ru, <https://orcid.org/0000000299539203>

⁴ gulyaeva.yul@yandex.ru, <https://orcid.org/0000000157732315>

Abstract. *The technology of industrial production of beer is a chain of logically interconnected physical and biochemical processes aimed at the transformation of polysaccharides contained in malt raw materials into mono- and disaccharides, which are necessary for subsequent fermentation processes, as well as for growing seed yeast. The rationale for the need to study these processes using the methods of a systematic approach is presented. In the article, on the basis of a three-level system approach, the influence of the granulometric composition of crushed malt raw materials on the viscosity properties of water-malt solutions is considered. It is noted that the particle size of crushed malt significantly affects the change in the dynamic viscosity of water-malt solutions in the process of water-thermal enzymatic treatment (HTFE). It has been shown that when carrying out the HTFO stage with water-malt suspensions composed of crushed malt particles with an average diameter of 1 mm, after the start of gelatinization of native starch, the value of dynamic viscosity sharply increases several times. It is stated that complex studies of this kind have not been carried out before. The obtained results will allow to determine the optimal average particle diameter of the crushed malt used for the preparation of the hydro-module, to clarify the kinetics of the HTFO process, and to reduce the energy consumption for its implementation.*

Keywords: *Multiphase media, multicomponent media, apparatus, mashing, suspension, hydro-module, hydrodynamic processes, thermal processes, mass transfer processes, water-soluble carbohydrates, viscosity.*

For citation: Kravtsova, E. V., Novoselov, A. G., Kuznetsov, A. Yu. & Gulyaeva, Yu. N. (2022). Analysis of processes and apparatuses that implement the technological stages of beer production. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 117-122. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.016.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новой конструкции аппарата или применение уже известной, для последовательного проведения определенных стадий технологического процесса пива, является достаточно сложной задачей. Ее решение требует всестороннего, или иными словами, системного анализа физико-химических процессов, происходящих в его рабочем объеме, в соответствии с разработанной технологией для данной стадии технологического процесса. В общем случае под системным анализом понимается упорядоченная и логически

связанная система данных и информации в виде физических и математических моделей. При этом разработанные модели должны сопровождаться тщательной проверкой экспериментом с целью понимания их достоверности и дальнейшего совершенствования

Основываясь на представлениях о пространственном масштабе, в границах которого осуществляются те или иные процессы, с учетом известных явлений были выделены пять ступеней структурной иерархии [1,2,3,4]:

– комплекс явлений, происходящих на атомарно-молекулярном уровне;

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА

- комплекс явлений, происходящих на уровне молекулярных частиц;
- комплекс явлений, происходящих при движении единичного включения дисперсной фазы, с учетом физико-химических реакций и явлений межфазного тепло- и массопереноса;
- комплекс явлений, происходящих при проведении физико-химических процессов при массовом движении включений дисперсной фазы в условиях стесненности;
- комплекс явлений, определяющих гидродинамическую обстановку в масштабе аппарата.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Позднее, автором работы [6], был предложен более простой 3-х уровневый системный подход к анализу процессов, происходящих в многофазных, многокомпонентных средах. Предложенный подход также основан на многоуровневом иерархическом принципе анализа физико-химической системы и был упрощен для удобства понимания и систематизации полученных данных. В основе методики этого анализа лежат три подсистемных блока, условно названные «Среда», «Энергия» и «Аппарат», рисунок 1.



Рисунок 1 - Основные подсистемные блоки [6]

Figure 1 - Main subsystems blocks [6]

Автор работы [6] предложил проводить декомпозицию каждой, отдельно взятой, стадии технологического процесса и детально анализировать каждый из подсистемных блоков. Эта методика анализа была апробирована при разработке новых конструкций технологических аппаратов, применяемых в дрожжевой [6], спиртовой [7,8,9,10,11,12] и пивной [13,14,15] отраслях промышленности. Применение стратегии системного анализа оказалось весьма успешным, что привело к его развитию и широкому использованию при анализе и совершенствовании процессов и аппаратов химических и пищевых производств.

Классическая технология производства пива представляет собой достаточно сложную трансформацию исходного сырья (солода и воды) в готовый продукт (пиво). На стадии затирания осуществляется водно-тепловая,

ферментативная обработка (ВТФО) измельченного солода. Главная задача, которая решается при проведении ВТФО, это перевод нативных углеводов, содержащихся в зернах солода, в водорастворимые углеводы (мальтозу, глюкозу, декстрины), которые, на стадии брожения, будут являться питательной средой для микроорганизмов. Для решения этой задачи в аппаратах, реализующих ВТФО, проводятся, последовательно, следующие физические процессы:

- гидродинамические процессы, связанные со смешиванием твердой фазы (частицы измельченного солода) с жидкостной фазой (вода);
- тепловые процессы, связанные с нагревом суспензии и, по окончании процесса ВТФО, охлаждением суслу;
- массообменные процессы, связанные с трансформацией, на молекулярном уровне, полисахаридов крахмала в моносахариды и дисахариды, происходящие под влиянием повышенных температур и содержащихся в солоде разжижающих ферментов, в частности, α -амилазы.

От эффективности проведения этих процессов в соответствующих технологических аппаратах во многом зависит качество конечного продукта – пива.

Основываясь на традиционной технологии производства пива и машинно-аппаратурной схеме ее реализующей, можно видеть, что, этап приготовления суслу и подготовки его к сбраживанию является самым материало- и энергоемким [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ процесса ВТФО, выполненный в работах [13,14,15], показал, что, в процессе его проведения, по мере повышения температуры затора, возникает резкое увеличение вязкости водно-солодовой суспензии. Такой характер изменения вязкости водно-солодовой суспензии наблюдался во всех экспериментах с различными гидромодулями в диапазоне их изменения от 1:4 до 1:2,5 и при различных градиентах скорости сдвига от 2 с^{-1} до 1000 с^{-1} . С повышением концентрации измельченного солода вязкость суспензии возрастала. На основании экспериментальных исследований, представленных в открытой печати [13,14,15], можно сделать следующее заключение, что вязкость водно-солодовых суспензий, в процессе проведения ВТФО, зависит от:

- концентрации измельченного солода;

- температурного режима проведения рабочего процесса ВТФО;
- содержания разжижающих нативных ферментов в солоде;
- гидродинамической обстановки в заторных аппаратах.

Как видно из графика, представленного на рисунке 2, максимальное значение вязкости суспензии имеет после окончания процесса набухания солодовых частиц. Здесь следует заметить, что процесс набухания, т.е. увеличения их в размерах, одновременно сопровождается и растворением поверхностных слоев. Эти

два процесса идут параллельно, но скорости набухания и растворения – различны и во многом зависят от размера частиц солода.

Чем больше крупность частиц, тем дольше необходимо проводить режим ВТФО, при сопоставимых гидродинамических и температурных условиях, а, следовательно, следует ожидать и более высокие значения вязкости суспензий. Косвенно, это подтверждается рядом работ, например, [16, 17], но конкретных исследований, в этом направлении, нет.

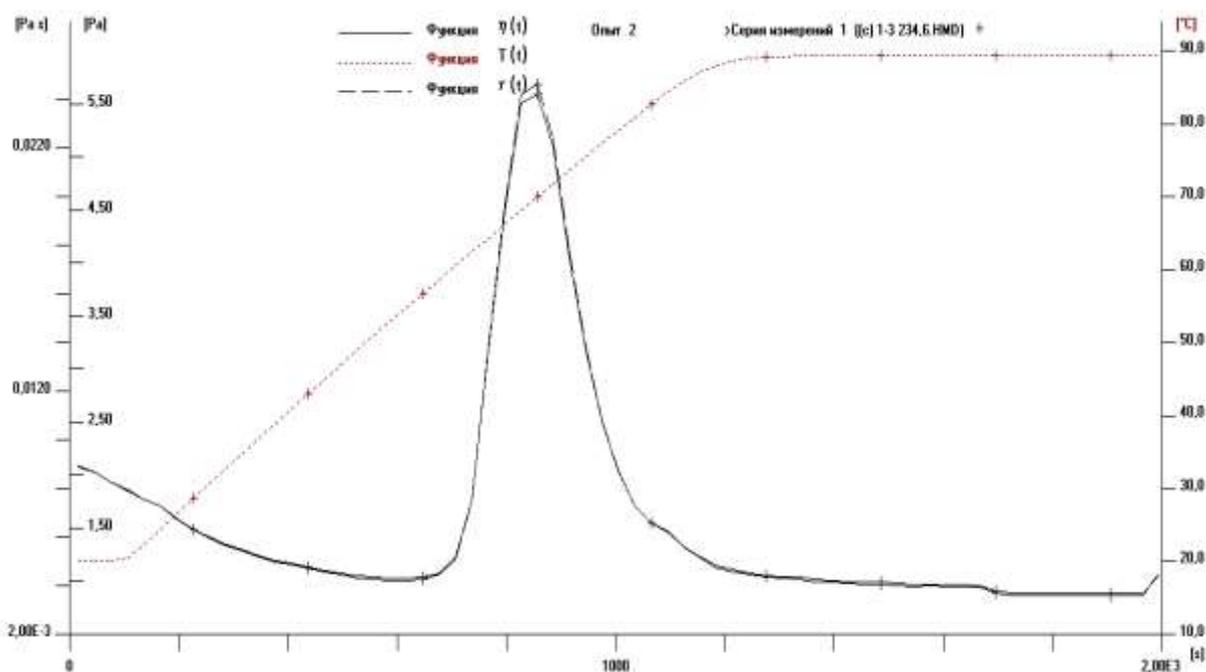


Рисунок 2 – Вязкостно-температурная зависимость водно-солодовой суспензии гидромодуль 1:2,5, градиент скорости сдвига $-234,6 \text{ с}^{-1}$ [13]

Figure 2 – Viscosity-temperature dependence of water-malt suspension hydromodule 1:2.5, shear rate gradient -234.6 s^{-1} [13]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой связи, представляет большой научный и практический интерес, выяснение влияния размера солодовых частиц на вязкость водно-солодовых суспензий. В свою очередь, полученные результаты, позволят определить средний диаметр частиц измельченного солода, идущего на составление гидромодуля, уточнить кинетику проведения процесса ВТФО, и уменьшить энергозатраты на его проведение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии: Общие стратегии. М.: Наука, 1976. 499с.

2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии: Топологический принцип формализации. М.: Наука, 1979. 393с.

3. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.:Химия, 1985. 448с.

4. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Марков В.П. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств. М.: Наука, 1986. 367с.

5. Новоселов А.Г. Системный подход к анализу процессов в многофазных средах химических и биохимических производств. // М.: Химическое и нефтехимическое машиностроение, 1996, №3, С.3-5.

6. Новоселов А.Г. Интенсификация массообмена между газом и жидкостью и разработка высо-

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА ПИВА

коэффициентов аппаратов для пищевой и микробиологической промышленности: Дисс. д-ра. техн. наук. СПб., 2002. 362 с.

7. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Ибрагимов Т.С. Производство этилового спирта в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате по низкотемпературной схеме // Техника и технология пищевых производств. 2012. №1 (24). С. 112-115.

8. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Ибрагимов Т.С. Характерные особенности изменения реологических свойств водно-зерновых суспензий в процессе водно-тепловой и ферментативной обработки (ВТФО) зернового сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 1(15). С. 30.

9. Чеботарь А.В., Петрова Н.Л., Новоселов А.Г. Исследование влияния амилолитических ферментов на вязкость водно-зерновой суспензии в процессе водно-тепловой ферментативной обработки ячменного зерна // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 1(19). С. 41.

10. Чеботарь А.В. Совершенствование спиртовых производств на основе экспериментальных исследований рео- и гидродинамики водно-зерновых суспензий в трубах технологических аппаратов.: дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2014. 94 - 136 с.

11. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Гуляева Ю.Н. Системный подход к анализу процесса водно-тепловой и ферментативной обработки зернового материала в технологии производства пищевого этанола. 1. Анализ блока «Среда» // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 4(22). С. 236-243.

12. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Сивенков А.В. Системный подход к анализу процесса водно-тепловой и ферментативной обработки зернового материала в технологии производства пищевого этанола. Часть 2. Анализ блоков «Энергия» и «Аппарат» // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств - 2015. - № 1(23). С. 126-131.

13. Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Степаненко А.В., Гуляева Ю.Н. Исследование реологических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе измельченного солода // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2016. № 4(30). С. 83-90.

14. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Малахов Ю.Л., Чеботарь А.В. Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Научное обоснование выбора метода исследований и разработка экспериментального стенда // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2017. № 1(31). С. 42-51.

15. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива. – СПб., Профессия, 2001. – 912с.

16. Устинников Б.А., Громов С.И., Полуянова М.Т.. Зависимость выхода спирта от степени измельчения зерна при непрерывном разваривании // Ферментная и спиртовая промышленность. М., 1970, № 4, С. 14-16.

16. Ustinnikov, B. A., Gromov, S. I. & Poluyanov, M. T. Dependence of alcohol yield on the degree of grain refining during continuous boiling. *Enzymatic and Alcohol Industry*. М., 1970, no. 4, S. 14-16.

17. Сабиров А.А. Разработка технологии переработка ржи для получения сиропа и белковых добавок. Дисс. канд. техн. наук. – СПб, Университет ИТМО, 2019, 18 с.

Информация об авторах

Е. В. Кравцова – к.т.н., преподаватель, факультет Биотехнологий, Университет ИТМО.

А. Г. Новоселов – д.т.н., преподаватель, факультет Биотехнологий, Университет ИТМО.

А. Ю. Кузнецов – аспирант, Университет ИТМО.

Ю. Н. Гуляева – к.т.н., сотрудник научно-исследовательский институт (военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации) Военной академии материально-технического обеспечения.

REFERENCES

1. Kafarov, V.V. & Dorokhov, I.N. (1976). System Analysis of Chemical Technology Processes: General Strategies. М.: Nauka, 499 p. (In Russ.).

2. Kafarov, V.V. & Dorokhov, I.N. (1979). System analysis of chemical technology processes: Topological principle of formalization. М.: Nauka, 393 p. (In Russ.).

3. Kafarov, V.V. (1985). Methods of cybernetics in chemistry and chemical technology. М.: Chemistry, 448 p. (In Russ.).

4. Kafarov, V.V., Dorokhov, I.N. & Markov, V.P. (1986). System analysis of chemical technology processes. Application of the method of fuzzy sets. М.: Nauka, 367p. (In Russ.).

5. Novoselov, A.G. (1996). A systematic approach to the analysis of processes in multiphase media of chemical and biochemical industries. *Chemical and petrochemical engineering*, (3), 3-5. (In Russ.).

6. Novoselov, A.G. (2002). Intensification of mass exchange between gas and liquid and the development of highly efficient devices for the food and microbiological industries. *Candidate's thesis*. St. Petersburg. (In Russ.).

7. Novoselov, A.G., Chebotar, A.V. & Ibragimov, T.S. (2012). Production of ethyl alcohol in a shell-and-pipe jet-injection apparatus according to a low-temperature scheme. *Technique and technology of food production*. 1 (24). 112-115. (In Russ.).

8. Novoselov, A.G., Chebotar, A.V. & Ibragimov, T.S. (2013). Characteristic features of the change in the rheological properties of water-grain suspensions in the process of water-thermal and enzymatic processing (WTF) of grain raw materials. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and devices for food production*, 1(15). 30. (In Russ.).

9. Chebotar, A.V., Petrova, N.L. & Novoselov A.G. (2014). Investigation of the influence of amylolytic enzymes on the viscosity of water-grain suspension in the process of water-thermal enzymatic treatment of barley grain. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and apparatuses for food production*. 1 (19). S. 41. (In Russ.).

10. Chebotar, A.V. (2014). Improvement of alcohol production on the basis of experimental studies of rheo- and hydrodynamics of water-grain suspensions in pipes of technological apparatuses. *Candidate's thesis*. St. Petersburg: St. Petersburg Petersburg NRU ITMO. (In Russ.).

11. Novoselov, A.G., Chebotar, A.V. & Gulyaeva, Yu.N. (2014). A systematic approach to the analysis of the process of water-thermal and enzymatic processing of grain material in the technology of food ethanol production. 1. Analysis of the block "Environment". *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and devices for food production*. 4(22). 236-243. (In Russ.).

12. Novoselov, A.G., Gulyaeva, Yu.N. & Sivenkov, A.V. (2015). A systematic approach to the analysis of the process of water-thermal and enzymatic processing of grain material in the technology of food ethanol production. Part 2. Analysis of blocks "Energy" and "Apparatus". *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and apparatuses of food production*, 1(23). 126-131. (In Russ.).

13. Novoselov, A.G., Malakhov, Yu.L., Stepanenko, A.V. & Gulyaeva Yu.N. (2016). Study of the rheological properties of water-grain suspensions prepared on the basis of crushed malt. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and apparatuses for food production*. 4(30). 83-90. (In Russ.).

14. Novoselov, A.G., Gulyaeva, Yu.N., Malakhov, Yu.L. & Chebotar, A.V. (2017). Rheo- and hydrodynamics of grain suspensions. Scientific substantiation of the choice of research method and development of an experimental stand. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and apparatuses of food production*. 1(31). 42-51. (In Russ.).

15. Kuntze, V. & Mit, G. (2001). *Technology of malt and beer*. St. Petersburg: Profession. (In Russ.).

16. Ustinnikov, B. A., Gromov, S. I. & Poluyanov, M. T. (1970). Dependence of alcohol yield on the degree of grain refining during continuous boiling. *Enzymatic and Alcohol Industry*. (4), 14-16. (In Russ.).

17. Sabirov, A.A. (2019). Development of technology for processing rye to obtain syrup and protein supplements. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, ITMO University. (In Russ.).

Information about the authors

E. V. Kravtsova – Ph.D., Lecturer, Faculty of Biotechnology, ITMO University.

A. G. Novoselov – Doctor of Technical Sciences, Lecturer, Faculty of Biotechnology, ITMO University.

A. Yu. Kuznetsov – PhD student, ITMO University.

Yu. N. Gulyaeva – Ph.D., employee of the Research Institute (Military System Research of the Logistics Support of the Armed Forces of the Russian Federation) of the Military Academy of Logistics.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 14.06.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 15.08.2022.

The article was received by the editorial board on 14 June 2022 approved after editing on 25 July 2022; accepted for publication on 15 Aug 2022.