

# Исследование влияния фракционного состава размеров частиц на вязкость солодовых суспензий в процессе проведения их водно-тепловой обработки

А. Ю. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. Г. НОВОСЁЛОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>sasha\_2731@mail.ru, <sup>2</sup>agnovoselov@itmo.ru, <sup>3</sup>ivbaranov@itmo.ru

Университет ИТМО

*Разработка и проектирование высокоеффективных, универсальных конструкций тепло-массообменного оборудования, предназначенного для реализации современных технологий в пивоваренной промышленности невозможна без всестороннего изучения теплофизических свойств исходной рабочей среды в процессе ее трансформации в целевой продукт. Одной из важнейших стадий технологического процесса производства пива является стадия водно-тепловой обработки измельченного солода (ВТОИС), от успешной реализации которой зависит объем и качество конечной целевой продукции. В данной работе представлены: обоснование цели данных исследований; методика проведения экспериментов и результаты релогических исследований солодовых суспензий. Исследовались суспензии, приготовленные из следующих фракций: 0–0,18 мм; 0,18–0,25 мм; 0,25–0,3 мм; 0,3–0,425 мм; 0,425–0,5 мм; 0,5–0,71 мм; 0,71–1,00 мм, для каждого из гидромодулей (1:3; 1:4; 1:5). Получены экспериментальные значения динамической вязкости солодовых суспензий, для всех объектов исследований, в диапазоне изменения температуры 23–90 °С и диапазоне изменения градиента скоростей сдвига 2–500 с<sup>-1</sup>. На основании этих данных построены вязкостно-температурные характеристики для всех исследованных объектов исследований. Установлено, что, при достижении температуры солодовой суспензии 50–60 °С, у всех исследованных объектов, наблюдалось скачкообразное увеличение вязкостных свойств, связанное с процессом кластеризации нативного крахмала, и последующим их снижением. Проведенные исследования показывают, что измельчение солода меньше 0,5 мм не целесообразно, так как пиковые значения динамической вязкости имеют постоянную величину, и дальнейшее уменьшение частиц приведет к неоправданным затратам и, как следствие, к увеличению себестоимости целевого продукта. Результаты исследований позволяют существенно уточнить расчетные зависимости, связанные как с разработкой технологии производства пива, так и ее машинно-аппаратурного оформления новыми, высокоеффективными конструкциями технологических аппаратов*

**Ключевые слова:** реология, средний размер частиц фракции, релогические показатели, вязкостно-температурная кривая, гидромодуль.

#### Информация о статье:

Поступила в редакцию 02.01.2025, одобрена после рецензирования 27.02.2025, принята к печати 28.02.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-89-95

Язык статьи — русский

#### Для цитирования:

Кузнецов А. Ю., Новосёлов А. Г., Баранов И. В. Исследование влияния фракционного состава размеров частиц на вязкость солодовых суспензий в процессе проведения их водно-тепловой обработки. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 1. С. 89–95. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-89-95

## Influence of particle fractional composition on viscosity of malt suspensions during their water-heat treatment

А. Y. KUZNETSOV<sup>1</sup>, D. Sc. A. G. NOVOSELOV<sup>2</sup>, D. Sc. I. V. BARANOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>sasha\_2731@mail.ru, <sup>2</sup>agnovoselov@itmo.ru, <sup>3</sup>ivbaranov@itmo.ru

ITMO University

*The development and design of highly efficient and universal heat and mass exchange equipment for the implementation of modern technologies in the brewing industry is impossible without a comprehensive study of the thermophysical properties of the initial working medium in the process of its transformation into the target product. One of the most important stages of the technological process of beer production is the stage of water-heat treatment of milled malt (WTOIS), the successful realization of which determining the volume and quality of the final target product. This paper presents the following aspects of the research: justification of the purpose of this research; methodology of experiments, and results of rheological studies of malt suspensions. Suspensions prepared from the following fractions were studied: 0–0.18 mm; 0.18–0.25 mm; 0.25–0.3 mm; 0.3–0.425 mm; 0.425–0.5 mm; 0.5–0.71 mm; and 0.71–1.00 mm, for each of the hydromodules (1:3; 1:4; 1:5). Experimental values of dynamic viscosity of malt suspensions were obtained, for all objects of research, in the range*

of temperature variation of 23–90 °C and the range of shear rate gradient variation of 2–500 s<sup>-1</sup>. Based on these data, viscosity-temperature characteristics were analyzed for all the objects. It was found that when the temperature of malt suspension reached 50–60 °C, all the objects showed a jump-like increase in viscosity properties associated with the process of native starch pasteurization and their subsequent decrease. The research demonstrates that malt grinding of less than 0.5 mm is not reasonable, as the peak values of dynamic viscosity have a constant value. Further reduction of particles leads to unjustified costs and, as a consequence, to an increase in the cost of the target product. The results of the research allow to clarify substantially the calculation dependencies related both to the development of beer production technology and its equipment design by new, highly efficient technological apparatus.

**Keywords:** rheology, average particle size of the fraction, rheological parameters, viscosity-temperature curve, hydromodule.

#### Article info:

Received 02/01/2025, approved after reviewing 27/02/2025, accepted 28/02/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-89-95

Article in Russian

#### For citation:

Kuznetsov A. Y., Novoselov A. G., Baranov I. V. Influence of particle fractional composition on viscosity of malt suspensions during their water-heat treatment. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 1. p. 89-95. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-1-89-95

## Введение

Разработка и проектирование высокоеффективных, универсальных конструкций тепло-массообменного оборудования, предназначенного для реализации современных технологий в пивоваренной промышленности невозможна без всестороннего изучения теплофизических свойств исходной рабочей среды в процессе ее трансформации в целевой продукт [1]–[5]. Одной из важнейших стадий технологического процесса производства пива является стадия водно-тепловой обработки измельченного солода (ВТОИС), от успешной реализации которой зависит объем выпуска и качество конечной целевой продукции.

Разработка нового оборудования требует определенных и, как можно, более точных знаний о трансформации исходного сырья, при осуществлении проведения технологического процесса на данной стадии. Любой технологический процесс представляет собой совокупность физико-химических процессов, которые, в свою очередь, определяются гидродинамическими, тепловыми, массообменными и биохимическими процессами. Тепловые, массообменные и биохимические расчеты в полной мере зависят от гидродинамической обстановки, возникающей в рабочем объеме технологического аппарата и в коммуникациях, связывающих его с вспомогательным оборудованием. В свою очередь гидродинамическая обстановка определяется физическими свойствами рабочей среды, зависящими от фазового состояния и от количественного и качественного состава, образующих ее, химических элементов и подводимой к ней энергии. Кроме этого, знание физических свойств рабочей среды позволяет разработчикам технологий производства и проектировщикам технологического оборудования технически грамотно оценивать энергетические затраты на производство условной единицы продукции.

Одним из малоисследованных направлений, касающихся влияния морфологии твердых частиц на физические свойства супензий, является определение влияния размера частиц на вязкость солодовых супензий.

В работе [6], представлены результаты реологических исследований солодового сусла при различных концен-

трациях растворенных сухих веществ, а также зависимость плотности от содержания растворенных сухих веществ.

В ходе изучения вопроса приготовления водно-солодовых супензий были исследованы различные методики и параметры подготовки солода, которые были разработаны с целью достижения физических параметров солодовой супензии, эффективности производства пива за счет снижения энергоемкости и достижения оптимальных органолептических свойств [1, 2, 7–9].

Вопрос исследования влияния температуры и гидромодуля водно-солодовой супензии на вязкость изучался рядом исследователей [2, 6, 10, 11]. Проведённый анализ данных работ показал, что, несмотря на большое число опубликованных работ, вопрос влияния размеров измельченных частиц на вязкость водно-солодовой супензии не изучен.

Так в работе [2] рассматривалась стадия затирания в универсальном кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате (КСИА). На основе результатов экспериментов по определению реологических свойств солодовых супензий на установке Rheotest RN 4.1, были выполнены комплексные исследования реологических свойств солодовых супензий в широком диапазоне изменения гидромодулей, скоростей сдвига и температур, а также представлено описание конструкции аппарата. Однако в данном исследовании, в качестве сырья использовался солод, который был измельчен до 1 мм.

Исследования водно-солодовой супензии проводились в работе [12], в которой представлены, характерные для традиционного пивоварения, значения гидромодулей. Также, в данном исследовании, рассматривается влияние сусла, его компонентов и ферментов, гидролизующих крахмал, на студнеобразование мелких и крупных крахмальных гранул. Результаты дают представление о сложном взаимодействии ферментов и крахмала в процессе засыпки и иллюстрируют возможную важность пропорций мелких и крупных гранул крахмала в ячмене и солоде. Однако эксперименты проводились только на очень мелкой фракции около 0,5–3,5 мкм и отсутствует информация о влиянии размера фракции на реологические свойства супензии.

Интересные выводы, с точки зрения реологии, были сделаны в работе [13], где исследовался при ламинарном режиме течения унос газа свободными струями. Рабочие жидкости, которые использовались в данной работе, исследовали с целью определения влияния  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  на количество инжектируемого газа свободными струями в объеме неподвижной жидкости.

Как видно из работ [2, 3, 6, 13–16], динамическая вязкость очень сильно варьируется в зависимости от температур и гидромодулей супензии.

Данное исследование представляет интерес и с точки зрения эксплуатации данного оборудования, так как вязкость напрямую влияет на его работу [2] и необходимость использования разживающих ферментов. Следует отметить, что вопрос влияния размера фракции материалов на вязкость солодовых супензий так и не был раскрыт.

### Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование влияния среднего размера частиц фракций на вязкостные свойства солодовых супензий широком диапазоне концентраций твердой фазы и температур.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи.

1. Провести исследование поведения солодовых супензий в процессе водно-тепловой обработки.

2. Исследовать влияние величины гидромодуля, температуры, размера фракции и времени водно-тепловой обработки на коэффициент динамической вязкости.

3. Построить графические зависимости  $\mu$  от  $t$ , для следующих размеров фракций: 0–0,18 мм; 0,18–0,25 мм; 0,25–0,3 мм; 0,3–0,425 мм; 0,425–0,5 мм; 0,5–0,71 мм; 0,71–1 мм и для гидромодулей (1:3; 1:4; 1:5).

### Материалы и методы исследований

В качестве сырья использовался пивоваренный ячменный светлый солод урожая 2021 г., по параметрам он соответствует солоду 1-го класса [5].

Эксперименты по исследованию влияния гранулометрического состава на вязкость водно-солодовых супензий выполнялись согласно следующей методике.

Для приготовление водно-солодовой супензии был произведен размол и рассев солода, полученный помол затем был направлен на рассев, с помощью вибростола и набора сит. Набор сит был выбран следующим: 0,18 мм; 0,25 мм; 0,3 мм; 0,425 мм; 0,5 мм; 0,71 мм; 1 мм.

Полученный рассев с сит был разделен на следующие объекты исследований: 0–0,18 мм; 0,18–0,25 мм; 0,25–0,3 мм; 0,3–0,425 мм; 0,425–0,5 мм; 0,5–0,71 мм; 0,71–1 мм.

Расчет среднего размера частиц фракции выполнялся по формуле (1):

$$d_{cp} = \frac{d_{i-1} + d_i}{2}, \quad (1)$$

где  $d_i$  — размер верхнего сита, мм;  $d_{i-1}$  — размер нижнего сита, мм.

В качестве образцов были взяты помолы со степенью измельчения менее 1 мм. Далее каждый из помолов за-мачивался в воде при температуре 24–25 °C. Экспери-

менты проводились при следующих гидромодулях: 1:3; 1:4; 1:5, то есть при разном соотношении массы солода к объему воды. Данные гидромодули были выбраны, так как они являются наиболее актуальными в пивоварении.

Далее, солод, смешанный с водой, который представлял собой суспензию, выдерживался в покое, в течение 25 мин, чтобы процесс растворения был выполнен в полном объеме и неискажал картину результаты экспериментов при работе на приборе.

Исследование реодинамических характеристик солодовых супензий, проводилось с помощью ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1.

Эксперимент проводился в следующей последовательности.

1. Исследуемая проба солодовой супензии, имеющая температуру окружающей среды, переносилась в цилиндрический сосуд, который затем закреплялся в измерительной ячейке.

2. Задавались требуемая скорость сдвига  $\dot{\gamma}$  и время проведения опыта.

3. Проба доводилась до начальной температуры опыта  $T_{\text{нач}} = 20$  °C.

4. Запускалась программа измерений напряжений сдвига, изменения температуры и расчета коэффициента динамической вязкости в измерительной ячейке с отображением хода эксперимента на дисплее компьютера.

5. Для стабилизации температуры по объему проба выдерживалась при  $T_{\text{нач}} = 20$  °C в течение 10 мин, ротор при этом вращался, чтобы не допустить расслаивание среды.

6. Выставлялась конечная температура  $T_{\text{кон}} = 90$  °C.

5. По окончанию каждого опыта ячейка разбиралась, промывалась и собиралась с вновь внесенной пробой того же гидромодуля солодовой супензии.

6. Изменялся гидромодуль (или помол) и опыт повторялся.

Эксперименты проводились с фиксированной скоростью сдвига  $\dot{\gamma} = 300$  с<sup>-1</sup>, так как изменение скорости сдвига могло привести к изменению вязкости супензии, что могло повлиять на корректность полученных данных [2]. Данная скорость обусловлена скоростью вращения мешалки для симуляции реального процесса, происходящего при процессе затора.

Исследование физических свойств, в частности, реологических свойств, проводилось в диапазоне температур от 20 до 90 °C, так как данные температуры являются рабочими для вискозиметра. Время проведения каждого эксперимента составляло 2100 с.

### Результаты и их обсуждение

При фиксированной скорости сдвига производилось постепенное повышение температуры на термостате. Затем, по полученным результатам значений напряжений сдвига прибором рассчитывались значения коэффициентов динамической вязкости для каждого из исследуемых гидромодулей водно-солодовой супензии. В дальнейшем, по расчетным данным динамической вязкости строились вязкостно-температурные кривые.

Расчет проводился по уравнению (2):

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (2)$$

Скорость сдвига  $\dot{\gamma} = \text{const}$ , полученные данные по  $\tau$  усреднялись в пределах изменения температуры  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , затем высчитывалось среднеарифметическое значение и рассчитывалась величина коэффициента динамической вязкости при заданной температуре. По полученным данным строились графики зависимости  $\mu = f(t)$  и получали уравнения вязкостно-температурных кривых.

По результатам экспериментов по исследованию рединамических свойств водно-солодовых суспензий по приведенной выше методике были получены данные для всех исследованных гидромодулей и объектов исследований. Пример рабочей таблицы с внесенными данными представлен ниже для гидромодуля 1:3 и средним диаметром частиц 0,3625 мм представлен в табл. 1.

Что касается изменения вязкости водно-солодовой суспензии, то оно во многом связано с изменением структурно-механических свойств суспензии. В первую очередь, с трансформацией молекулярной решетки крахмальных зерен, которые состоят из двух полисахаридов — амилозы и амилопектина.

Так при низких температурах, измельченные частицы крахмала, имеющие вязкоупругую структуру, при добавлении воды образуют классическую суспензию. Вязкость суспензии определяется не только количеством частиц, но и размерами частиц, формой, и температурой воды. Однако, стоит отметить, что при повышении температуры выше 50–60 °C начинается интенсивная кластеризация крахмала. Это проявляется в разбухании крахмальных зерен и потере прочностных свойств. Таким образом, классическая суспензия превращается в гелевую.

образный раствор, данные преобразования видны как на рис. 1, так и на рис. 2.

На рис. 1. можем убедиться, что при достижении около 56–57 °C резко возросла вязкость водно-солодовой суспензии. Что весьма критично для тепло-массообменного оборудования и может существенно повысить энергетические затраты, а также привести к остановке оборудования из-за блокировок его участков.

Для снижения вязкости суспензии зачастую применяют химическое или ферментативное воздействие на полисахариды крахмала, что также влияет на эффективность производства [2]. В результате экспериментов, были обнаружены скачки вязкости суспензии при всех исследуемых степенях измельчения солода. Однако, влияние степени помола на вязкость солодовых суспензий начинается, когда средний размер частиц в помоле достигает значения 0,3625 мм и выше. Результаты для помола со средним размером частиц 0,3625 представлены в табл. 2.

Эксперименты подтвердили, что гидромодуль также очень сильно влияет на вязкость суспензии, чем больше воды, тем ниже значение вязкости, данный эффект виден особенно отчетливо на рис. 3. на крупном помоле.

## Выводы

На основании вышеприведенных результатов экспериментов можно сделать следующие выводы:

— реологическое поведение солодовых суспензий в процессе проведения водно-тепловой обработки аналогично реологическому поведению суспензий, созданных на основе ячменя крупностью 1 мм, и также харак-

Результаты ситового анализа  
The results of the sieve analysis

Таблица 1

Table 1

Размер сит (фракций), мм	0,000–0,180	0,180–0,250	0,250–0,300	0,300–0,425	0,425–0,500	0,500–0,710	0,710–1,000	1,000 и более
Средний размер частиц фракции, мм	0,09	0,215	0,275	0,3625	0,4625	0,605	0,855	—
Масса, г	198	118	50	467	234	389	104	209

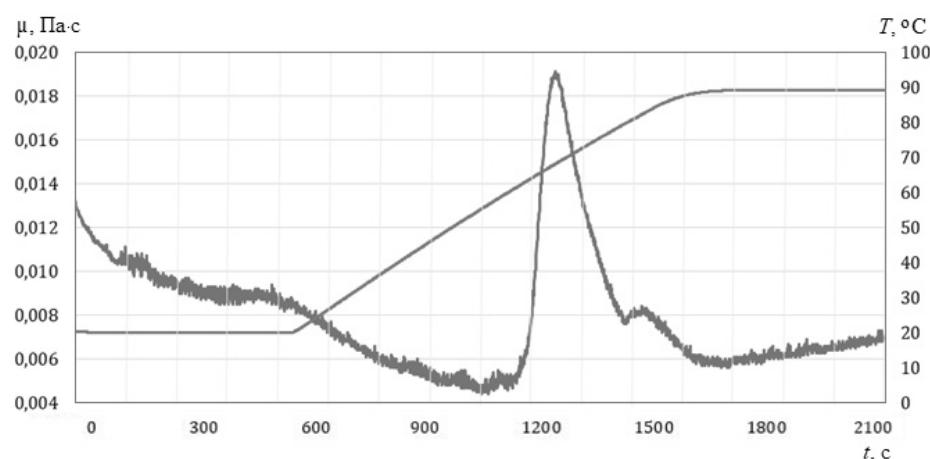


Рис. 1. Зависимость изменения  $\mu$  от  $t$  для помола 0,3–0,425 мм (гидромодуль 1:3)

Fig. 1. Dependence of the change of  $\mu$  on  $t$  for grinding 0.3–0.425 mm (hydromodulus 1:3)

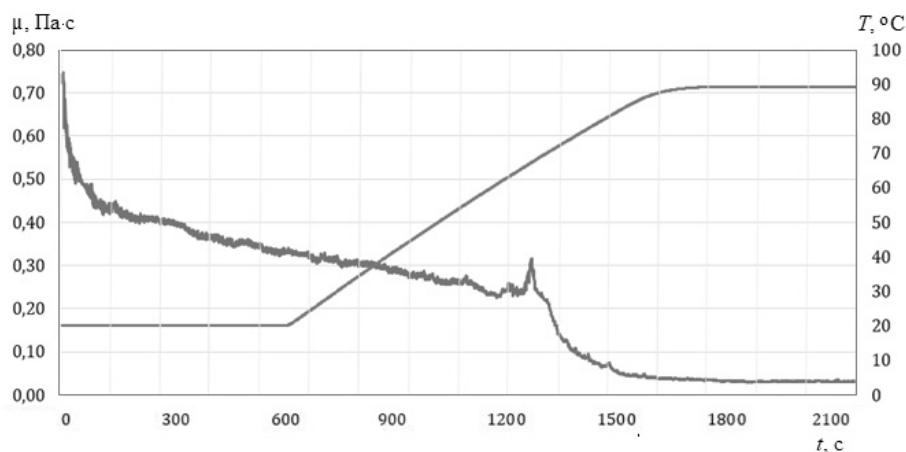
Рис. 2. Зависимость изменения  $\mu$  от  $t$  для помола 0,5–0,71 мм (гидромодуль 1:3)Fig. 2. Dependence of the change in  $\mu$  on  $t$  for grinding 0.5–0.71 mm (hydromodulus 1:3)

Таблица 2  
Результаты эксперимента для фракции 0,3–0,425 мм  
при гидромодуле 1:3

Table 2

Experimental results for the 0.3–0.425 mm fraction  
with a 1:3 hydromodule

Гидромодуль	Время, с	Температура, °C	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , $\text{с}^{-1}$	$\tau$ , Па	$\mu$ , Па·с
1:3	600	20	300	2,524	0,0084
	704	30		2,072	0,0069
	840	40		1,725	0,0058
	980	50		1,494	0,0050
	1130	60		1,494	0,0049
	1280	70		5,088	0,0169
	1440	80		2,347	0,0078
	1930	90		1,941	0,0065

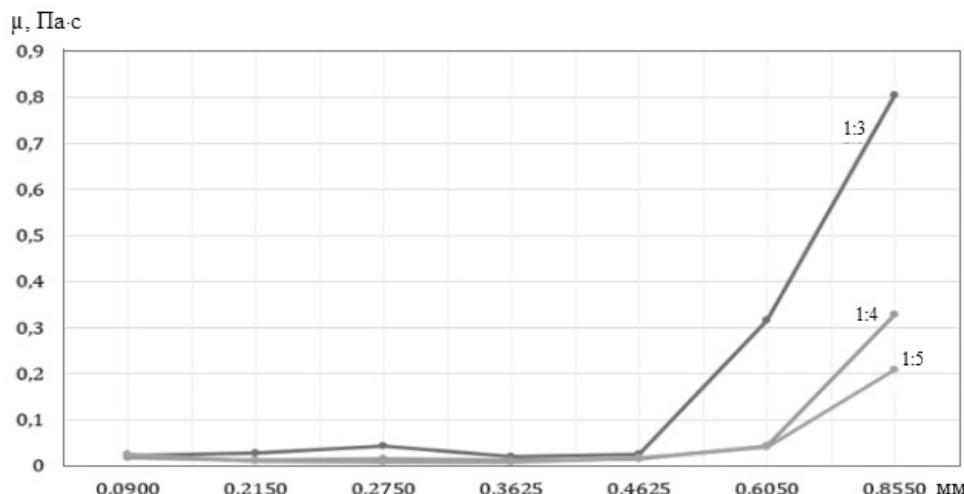
теризуется наличием 4-х зон по мере увеличения температуры, независимо от степени помола;

— значения коэффициента динамической вязкости солодовой суспензии зависит от величины гидромодуля, температуры, размера фракции и времени водно-тепловой обработки;

— были построены графические зависимости  $\mu$  от  $t$ , для следующих размеров фракций: 0–0,18 мм; 0,18–0,25 мм; 0,25–0,3 мм; 0,3–0,425 мм; 0,425–0,5 мм; 0,5–0,71 мм; 0,71–1 мм и для гидромодулей (1:3; 1:4; 1:5);

— впервые установлено, что влияние размера фракции на вязкость солодовых суспензий начинается, когда средний размер частиц в помоле достигает значения 0,3625 мм и выше; при среднем размере частиц помола меньше 0,3625 мм вязкость солодовых суспензий не зависит от величины гидромодуля;

— результаты исследований позволяют существенно уточнить расчетные зависимости связанные как с разработкой технологии производства пива, так и ее машино-аппаратурного оформления новыми, высокоеффективными конструкциями технологических аппаратов.

Рис. 3. Графики зависимости пиковых значений  $\mu$  от размера помола для каждого из исследуемых гидромодулейFig. 3. Dependence of peak values of  $\mu$  on the grinding size for each of the studied hydromodules

## Литература

1. Васильева М. А., Пермякова Л. В. Сравнительная оценка показателей светлого солода и его перерабатываемость. // Сборник тезисов VIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией А. Ю. Просекова. Том. 1. Биотехнологии, качество и безопасность. Пищевые инновации и биотехнологии. Кемерово, 2020. 17–19 с.
2. Малахов Ю. Л. Совершенствование машинно-аппаратурной схемы производства пива на базе малых предприятий. Дисс. канд. техн. наук. СПб, 2024. 437 с.
3. Агаев К. Э. Совершенствование гидродинамических процессов обработки пищевого сырья в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате. Дисс. канд. техн. наук. СПб, 2012. 148 с.
4. Дугнист А. В., Сивенков А. В., Новоселов А. Г. Повышение эффективности дрожжевого производства путём культивирования хлебопекарных дрожжей при высоких содержаниях биомассы. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2009. № 11. С. 47–51.
5. ГОСТ 29294–2021 Солод пивоваренный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2021. 6–10 с.
6. Малахов Ю. Л., Кузнецов А. Ю., Новоселов А. Г., Чеботарь А. В., Баранов И. В., Румянцева О. Н., Миронова Д. Ю. Экспериментальное исследование уноса газа свободными струями водно-солодовых суспензий в трубы кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата. // Проблемы региональной энергетики. 2023. № 2 (58). С. 107–121.
7. Xu Q., Liu W., Li W., Yao T., Chu X., Guo L. Numerical investigation on thermal hydraulic characteristics of steam jet condensation in subcooled water flow in pipes. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. vol. 184. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2021.122277.
8. Cervantes-Alvarez A. M., Escobar Ortega Y. Y., Sauret A., Pacheco-Vazquez F. Air entrainment and granular bubbles generated by a jet of grains entering water. // Journal of Colloid and Interface Science. 2020. vol. 574. pp. 285–292. DOI: 10.1016/j.jcis. 2020.04.009.
9. Remedios C., Belén Díaz A., Durán-Guerrero E., Lasanta C. Influence of different fermentation conditions on the analytical and sensory properties of craft beers: Hopping, fermentation temperature and yeast strain. // Journal of Food Composition and Analysis. 2022. vol. 106. DOI: 10.1016/j.jfca. 2021.104278.
10. Cela N., Galgano F., Perretti G., Di Cairano M., Tolve R., Condelli N. Assessment of brewing attitude of unmalted cereals and pseudocereals for gluten free beer production. // Food Chemistry. 2022. vol. 38 (4). DOI: 10.1016/j.foodchem. 2022.132621.
11. Bharath Kumar Goshika, Subrata Kumar Majumder. Entrainment and holdup of gas-liquid-liquid dispersion in a downflow gas-liquid-liquid contactor. // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2018. vol. 125. pp. 112–123. DOI: 10.1016/j.cep. 2018.01.011.
12. Hostašová Ludmila. Hodnocení vybraných vlastností mladiny vyrobené za podmínek vysokého tlaku. Diplomová práce. [Evaluation of selected properties of wort produced under high pressure conditions. Graduate work]. Zlín, 2022. 99 p. (In Czech).
13. De Schepper C. F., Courtin C. M. High mashing thickness negatively influences gelatinisation of small and large starch granules and starch conversion efficiency during barley malt brewing. // Food Hydrocolloids. 2022. vol. 131. DOI: 10.1016/j.foodhyd. 2022.107745.2022.107745.

## References

1. Vasilyeva M. A., Permyakova L. V. Comparative assessment of light malt indicators and its processability. collection of abstracts of the VIII International scientific conference of students, graduate students and young scientists. General editor A. Yu. Prosekov. Vol. 1. Biotechnology, quality and safety. Food innovations and biotechnology. Kemerovo, 2020. 17–19 p. (in Russian)
2. Malakhov Yu. L. Improvement of the machine-hardware scheme of beer production based on small enterprises. Diss. Cand. of Engineering Sciences. St. Petersburg, 2024. 437 p. (in Russian)
3. Agaev K. E. Improvement of hydrodynamic processes for processing food raw materials in a shell-and-tube jet injection apparatus. Diss. Cand. of Engineering Sciences. St. Petersburg, 2012. 148 p. (in Russian)
4. Dugnist A. V., Sivenkov A. V., Novoselov A. G. Increasing the efficiency of yeast production by cultivating baker's yeast at high biomass contents. *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2009. No. 11. P. 47–51. (in Russian)
5. State standard 29294–2021 Brewing malt. Specifications. Moscow: Standartinform, 2021. 6–10 p. (in Russian)
6. Malakhov Yu. L., Kuznetsov A. Yu., Novoselov A. G., Chebotar A. V., Baranov I. V., Rumyantseva O. N., Mironova D. Yu. Experimental Study of Gas Entrainment by Free Jets of Water-Slurry Suspensions into Tubes of Shell-and-Tube Jet-Injection Apparatus. *Problems of regional energy*. 2023. No. 2 (58). P. 107–121. (in Russian)
7. Xu Q., Liu W., Li W., Yao T., Chu X., Guo L. Numerical investigation on thermal hydraulic characteristics of steam jet condensation in subcooled water flow in pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 184. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2021.122277.
8. Cervantes-Alvarez A. M., Escobar Ortega Y. Y., Sauret A., Pacheco-Vazquez F. Air entrainment and granular bubbles generated by a jet of grains entering water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, vol. 574, pp. 285–292. DOI: 10.1016/j.jcis. 2020.04.009.
9. Remedios C., Belén Díaz A., Durán-Guerrero E., Lasanta C. Influence of different fermentation conditions on the analytical and sensory properties of craft beers: Hopping, fermentation temperature and yeast strain. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022, vol. 106. DOI: 10.1016/j.jfca. 2021.104278.
10. Cela N., Galgano F., Perretti G., Di Cairano M., Tolve R., Condelli N. Assessment of brewing attitude of unmalted cereals and pseudocereals for gluten free beer production. *Food Chemistry*. 2022, vol. 38 (4). DOI: 10.1016/j.foodchem. 2022.132621.
11. Bharath Kumar Goshika, Subrata Kumar Majumder. Entrainment and holdup of gas-liquid-liquid dispersion in a downflow gas-liquid-liquid contactor. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2018, vol. 125. pp. 112–123. DOI: 10.1016/j.cep. 2018.01.011.
12. Hostašová Ludmila. Hodnocení vybraných vlastností mladiny vyrobené za podmínek vysokého tlaku. Diplomová práce. [Evaluation of selected properties of wort produced under high pressure conditions. Graduate work]. Zlín, 2022. 99 p. (In Czech).
13. De Schepper C. F., Courtin C. M. High mashing thickness negatively influences gelatinization of small and large starch granules and starch conversion efficiency during barley malt brewing. *Food Hydrocolloids*. 2022. vol. 131. DOI: 10.1016/j.foodhyd. 2022.107745.2022.107745.

14. Lin T, Donnelly H. Gas bubble entrainment by Plunging Laminar liquid jets. // A. I. Ch. E. J., 1966. v. 12. N. 3, pp. 563–571. DOI: 10.1002/AIC. 690120331.
15. Bharath Kumar Goshika, Subrata Kumar Majumder. Dispersion of liquid — liquid phase by a jet-induced gas — liquid — liquid mixing column developed for separation of organic pollutants. // Separation Science and Technology, 2019, vol. 54. DOI: 10.1080/01496395.2018.1504796.
16. Bongliba T. Sangtam, Subrata Kumar Majumder. Entrainment characteristic of liquid — liquid dispersion in a jet-driven mixing column: Substantial for process intensification in liquid — liquid extraction. // Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. 2020. vol. 153. DOI: 10.1016/j.cep. 2020.107927.
14. Lin T, Donnelly H. Gas bubble entrainment by Plunging Laminar liquid jets. *A. I. Ch. E. J.* 1966. v. 12, N. 3, pp. 563–571. DOI: 10.1002/AIC. 690120331.
15. Bharath Kumar Goshika, Subrata Kumar Majumder. Dispersion of liquid — liquid phase by a jet-induced gas — liquid — liquid mixing column developed for separation of organic pollutants. *Separation Science and Technology*. 2019, vol. 54. DOI: 10.1080/01496395.2018.1504796.
16. Bongliba T. Sangtam, Subrata Kumar Majumder. Entrainment characteristic of liquid — liquid dispersion in a jet-driven mixing column: Substantial for process intensification in liquid — liquid extraction. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2020, vol. 153. DOI: 10.1016/j.cep. 2020.107927.

### Сведения об авторах

#### Кузнецов Александр Юрьевич

Аспирант, инженер образовательного центра  
«Энергоэффективные инженерные системы», Университет  
ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,  
sasha\_2731@mail.ru. ORCID: 0000-0002-9953-9203

#### Новосёлов Александр Геннадьевич

Д. т. н., профессор, доцент образовательного центра  
«Энергоэффективные инженерные системы», Университет  
ИТМО, Санкт-Петербург, 191002, Россия, Санкт-Петербург,  
ул. Ломоносова, 9, agnovoselov@itmo.ru.  
ORCID: 0000-0002-9432-7447

#### Баранов Игорь Владимирович

Д. т. н., профессор, директор образовательного центра  
«Энергоэффективные инженерные системы», Университет  
ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9,  
ivbaranov@itmo.ru. ORCID: 0000-0003-0595-368X

### Information about authors

#### Kuznetsov Aleksandr Y.

Postgraduate student, Engineer of the Educational Center  
«Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University,  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,  
sasha\_2731@mail.ru. ORCID: 0000-0002-9953-9203

#### Novoselov Alexander G.

D. Sc., Professor, Associate Professor of the Educational  
Center «Energy Efficient Engineering Systems»,  
ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg,  
Lomonosov str., 9, agnovoselov@itmo.ru.  
ORCID: 0000-0002-9432-7447

#### Baranov Igor V.

D. Sc., Professor, Director of the educational center  
«Energy Efficient Engineering Systems», ITMO University,  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,  
ivbaranov@itmo.ru. ORCID: 0000-0003-0595-368X



Статья доступна по лицензии  
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

## О Перечне рецензируемых научных изданий

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

**Вестник Международной академии холода**, включенный в Перечень рецензируемых научных изданий (по состоянию на 05.02.2025 г.) под № 555, принимает статьи по следующим научным направлениям:

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики
- 1.3.8. Физика конденсированного состояния
- 1.3.10. Физика низких температур
- 1.3.14. Термофизика и теоретическая теплотехника
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники
- 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
- 4.3.3. Пищевые системы
- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ