

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВАННОГО И ОХМЕЛЕННОГО ПИВНОГО СУСЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ

Д.Д. Темершин, А.Г. Новоселов, Ю.Н. Гуляева, Е.В. Рогожин

Цель данной работы – определение реологических свойств фильтрованного и охмеленного пивного сусла при различных диапазонах градиента скорости. Реологические исследования проводились при двух диапазонах градиента скорости: от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1} и от 100 с^{-1} до 200 с^{-1} при температурах: $20 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$. Полученные данные показывают, что измерение реологических свойств фильтрованного и охмеленного сусла при диапазоне градиента скорости от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1} не дает корректных данных о динамической вязкости и напряжении сдвига, явно их искажая, что может привести к неправильной оценке гидравлических потерь при расчете трубопроводов и оборудования. Причиной искажения исследуемых параметров является появление турбулентного режима течения жидкости в измерительной ячейке из-за увеличения градиента скорости. Определено, что при диапазоне градиента скорости от 100 с^{-1} до 200 с^{-1} измерение реологических свойств фильтрованного и охмеленного сусла дает корректные данные, совпадающие со сторонними источниками. Обработка экспериментальных данных показало, что для фильтрованного сусла напряжение сдвига при увеличении температуры с $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $80 \text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается в 3,42 раза, а динамическая вязкость в 3 раза. Для охмеленного сусла напряжение сдвига при увеличении температуры с $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $80 \text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается в 2,17 раз, а динамическая вязкость в 2,5 раза. В обоих случаях наблюдался Ньютонский режим течения.

Ключевые слова: динамическая вязкость, реология, напряжение сдвига, ротационный вискозиметр, кривая течения, кривая вязкости, ньютонская жидкость, пивное сусло, фильтрация, охмеление.

Пивоварение – является одним из сложных с точки зрения трансформации исходного сырья в готовый продукт, пищевых производств, которое сочетает в себе механические, гидромеханические, тепло-массообменные и биотехнологические процессы [1].

Приготовление пивного сусла начинается с технологической стадии затирания – процесса смешивания воды и дробленого солода в определенных пропорциях и выдержкой при определенных температурных паузах. Затем осахаренный затор перекачивается в фильтр-чан, где происходит гидромеханический процесс разделения жидкой фракции – пивного сусла от твердой, а именно пивной дробины. После чего сусло кипятится с хмелем и очищается от хмелевых взвесей в гидроциклоне, охлаждается, аэрируется, засеивается дрожжами и перекачивается в бродительное отделение.

Во всех вышеперечисленных стадиях технологического процесса важнейшую роль играет гидродинамическая обстановка в аппаратах их реализующих.

Как правило, интенсивность, движения рабочей среды определяет скорость переноса импульса, теплоты и массы и, как следствие, время проведения соответствующего технологического процесса. На гидродинами-

ческую обстановку существенно влияет качественный и количественный состав рабочей среды и ее физические свойства, в частности вязкость. В зависимости от гидродинамической обстановки меняется количественный и качественный состав рабочей среды, изменяются ее физические свойства, в т. ч. ее вязкость, численно оцениваемая коэффициентом динамической вязкости. Кроме того, существенную роль на величину значения коэффициента динамической вязкости рабочей среды влияет температура, при которой происходит тот или иной технологический процесс.

Таким образом, для проведения гидравлических расчетов отдельных технологических аппаратов и связывающих их в единую технологическую линию трубопроводов необходимо знание коэффициентов динамической вязкости рабочей среды на всем протяжении технологической цепочки.

Известны работы [2–8], связанные с изучением вязкостных характеристик пива. В работах [2, 3] изучались реологические свойства светлого пива. В работе [4] авторы изучали влияние времени хранения пива на реологические характеристики темного пива. В работе [5] представлены данные зависимости динамической вязкости темного пива от

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВАННОГО И ОХМЕЛЕННОГО СУСЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ

температуры. В работе [6, 7] авторы изучали реологические свойства сусла при различных технологических стадиях. В работе [8] авторы сравнивали реологические свойства охмеленного и осахаренного сусла при различных температурах. В работе [9, 10] изучались реодинамические характеристики водно-зерновых суспензий на основе ячменного солода.

Из вышеперечисленных работ только исследования [8, 9, 10] связаны с изучением реологических свойств пивного сусла на различных стадиях. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время мало работ, связанных с изучением физических свойств фильтрованного и охмеленного сусла.

Целью данной работы являлись исследование реологических свойств фильтрованного и охмеленного пивного сусла при различных градиентах скорости и температурах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

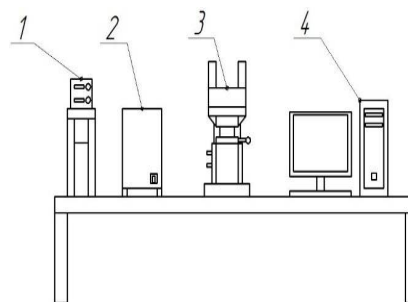
Для определения реологических свойств использовалось отфильтрованное сусло после затирания и охмеленное сусло после стадии варки. Гидромуль при затирании составлял 1:5, который используется при производстве лагерного пива. Приготовление пивного сусла происходило при следующих температурных режимах:

- 1) мальтозная пауза (62 °С) – 60 мин;
- 2) осахаривание (72 °С) – 30 мин;
- 3) инактивация ферментов (80 °С) – 15 мин.

Процесс кипячения с хмелем продолжался 90 мин при температуре 90 °С. Хмель добавлялся в начале процесса с концентрацией 2 г/л. Плотность фильтрованного и охмеленного сусла составляли 1058 кг/м³ и 1062 кг/м³ соответственно. Реологические измерения образцов проводились на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1 S.E (рисунок 1) с концентрической геометрией цилиндров. Конструкция данного вискозиметра основана на принципе Серле, суть которой заключается в том, что ротор вращается, а измерительная ячейка остаётся неподвижной (рисунок 2).

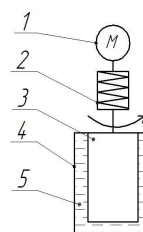
Изучение реологических свойств фильтрованного и охмеленного сусла происходило при следующих режимах измерений:

- 1) первый – в диапазоне градиентов скорости от 10 с⁻¹ до 1000 с⁻¹ при температурах 20–80 °С;
- 2) второй – в диапазоне градиентов скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ при температурах 20–80 °С.



- 1 – нагреватель / охладитель;
- 2 – измерительный блок ротационного вискозиметра;
- 3 – ротационный вискозиметр;
- 4 – компьютер для вывода данных

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки



- 1 – двигатель;
- 2 – датчик измерения напряжения сдвига;
- 3 – ротор;
- 4 – корпус измерительной ячейки;
- 5 – исследуемая среда

Рисунок 2 – Измерительная система Серле

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По полученным данным, для обоих режимов были построены кривые течения фильтрованного сусла и охмеленного сусла (рисунки 3, 4) и зависимости коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ при различных температурах фильтрованного сусла (рисунки 5, 6).

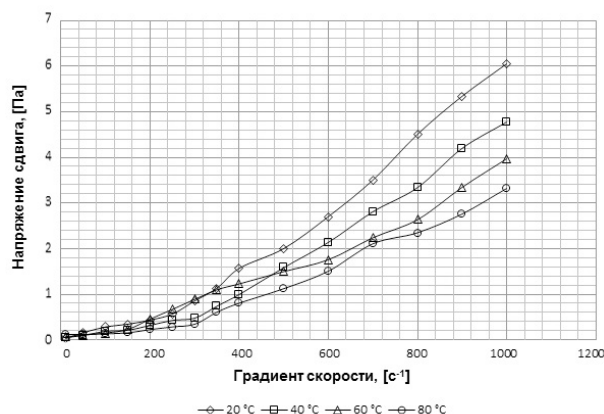


Рисунок 3 – Кривые течения фильтрованного сусла (первый режим). Диапазон градиента скорости от 10 с⁻¹ до 1000 с⁻¹

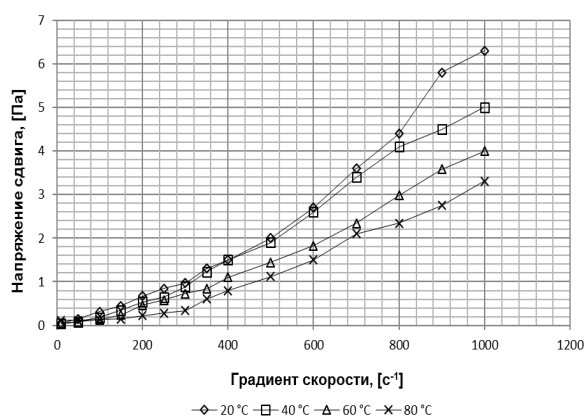


Рисунок 4 – Кривые течения охмеленного сусла (первый режим). Диапазон градиента скорости от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1}

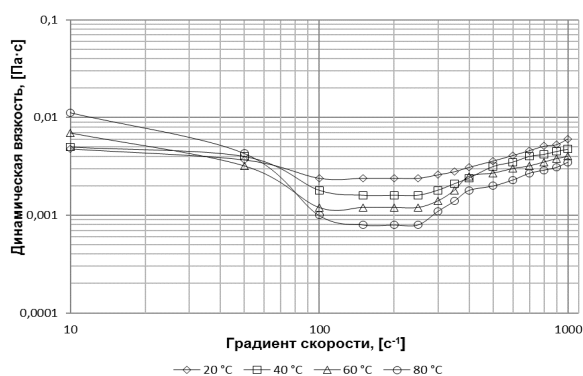


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента динамической вязкости фильтрованного сусла от градиента скорости сдвига (первый режим). Диапазон изменений градиента скорости от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1}

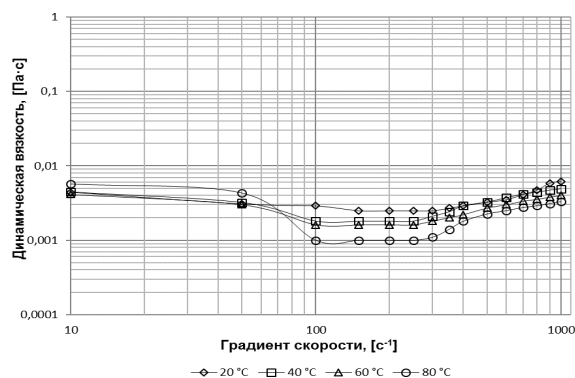


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента динамической вязкости фильтрованного сусла от градиента скорости сдвига (первый режим). Диапазон изменений градиента скорости от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1}

На рисунках 3 и 4 изображены кривые течения фильтрованного и охмеленного сусла при диапазоне градиента скорости от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1} . На обоих графиках визуально заметно, что при диапазоне градиента скорости

от 100 с^{-1} до 200 с^{-1} кривые имеют линейный вид, однако при увеличении градиента скорости видно, что напряжение сдвига резко увеличивается, и кривые течения теряют свою линейность.

На рисунках 5 и 6 показаны графические зависимости коэффициента динамической вязкости от градиента скорости сдвига фильтрованного и охмеленного сусла при диапазоне градиента скорости от 10 с^{-1} до 1000 с^{-1} . На обоих графиках видно, что в диапазоне градиента скорости от 10 с^{-1} до 100 с^{-1} значение динамической вязкости в самом начале имеет высокие показатели, а затем резко падает, но в диапазоне от 100 с^{-1} до 200 с^{-1} остается постоянным. Затем с увеличением градиента скорости начинает увеличиваться значение динамической вязкости. Ее изменение с увеличением градиента скорости является признаком не-ньютоновской жидкости, что противоречит имеющейся информации о данном виде сырья [8, 9]. У ньютоновской жидкости кривая вязкости имеет вид горизонтальной прямой и описывается линейным уравнением. В данном же случае, описываемые кривые вязкости определенно не имеют такого вида. В дополнении к этому, значения динамической вязкости для фильтрованного и охмеленного сусла имело крайне высокие показатели $\sim 60 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно, что противоречит справочным данным, т. к. динамическая вязкость пивного сусла составляет примерно $12\text{--}15 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при данной температуре.

Причиной увеличения значений динамической вязкости, напряжения сдвига и не-ньютоновского поведения двух образцов сусла на рисунках 3, 4, 5, 6 переходом исследуемой жидкости в измерительной ячейке из ламинарного режима в турбулентный с увеличением градиента скорости, что приводит к искажению данных. Такое явление характерно для маловязких жидкостей в ротационных вискозиметрах типа Серле. Увеличение градиента скорости вызывает турбулентность. Причиной их появления является совместное действие тангенциальных и центробежных сил на единицу объема жидкости [11].

На основании проведенных экспериментальных исследований было предложено определять величину коэффициента динамической вязкости исследуемых рабочих сред с помощью ротационных вискозиметров указанного типа в диапазоне градиента скорости от 100 с^{-1} до 200 с^{-1} . Результаты этих измерений представлены на рисунках 7–10. На рисунках 7, 8 – кривые течения фильтрованного сусла и охмеленного сусла соответственно, на рисунках 9, 10 – графические зависимости коэффициента динамической вязкости от градиента скорости сдвига при указанных выше температурах.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВАННОГО И ОХМЕЛЕННОГО СУСЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ

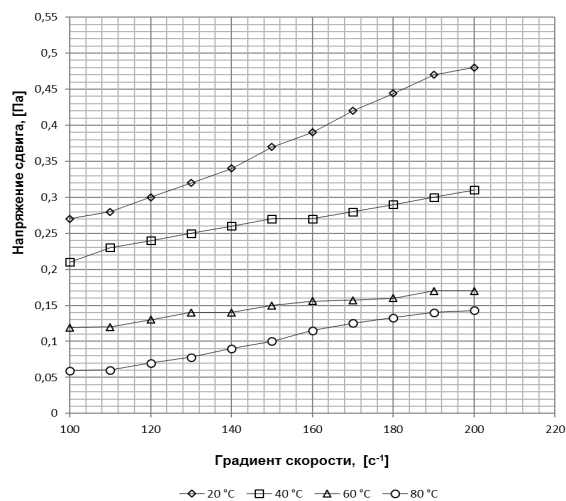


Рисунок 7 – Кривые течения фильтрованного сусла в диапазоне градиентов скоростей сдвига от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ (второй режим)

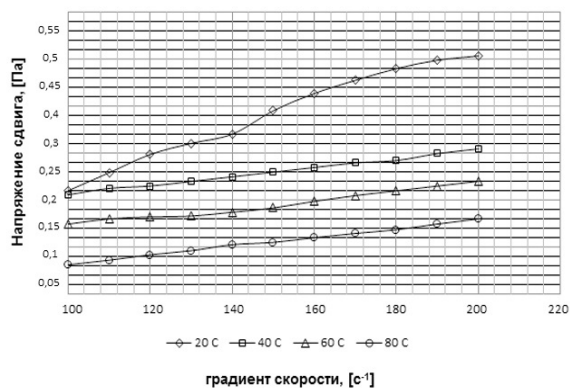


Рисунок 8 – Кривые течения охмеленного сусла в диапазоне градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ (второй режим)

Таблица 1 – Уравнения регрессии вязкостно-температурных кривых с коэффициентами детерминации при температуре 80 °C

Тип сусла	градиент скорости, с ⁻¹	Уравнение регрессии	R ²
Фильтрованное	1–1000	$\mu = 5E - 14 \gamma^4 - 1E - 10 \gamma^3 + 1E-07 \gamma^2 - 3E - 05 \gamma + 0,0049$	0,98
	100–200	$\mu = -5E-07 \gamma^4 + 0,0024$	0,92
Охмеленное	1–1000	$\mu = 2E - 14 \gamma^4 - 4E - 11 \gamma^3 + 4E-08 \gamma^2 - 2E - 05 \gamma + 0,0042$	0,97
	100–200	$\mu = -8E - 07 \gamma^4 + 0,0026$	0,92

Таблица 2 – Уравнения регрессии кривых течения с коэффициентами детерминации при температуре 80 °C

Тип сусла	градиент скорости, с ⁻¹	Уравнение регрессии	R ²
Фильтрованное	1–1000	$\tau = 4E - 06 \gamma^2 + 0,0012 \gamma - 0,0308$	0,98
	100–200	$\tau = 1E - 06 \gamma + 0,0025$	0,96
Охмеленное	1–1000	$\tau = 4E - 06 \gamma^2 + 0,0012 \gamma - 0,0308$	0,97
	100–200	$\tau = -8E - 07 \gamma^4 + 0,0026$	0,97

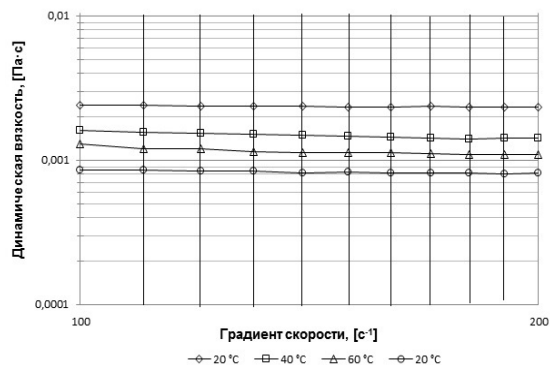


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента динамической вязкости фильтрованного сусла от градиента скорости сдвига. Диапазон изменений градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ (второй режим)

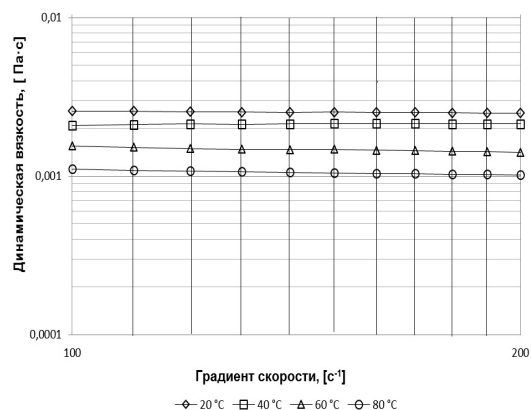


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента динамической вязкости охмеленного сусла от градиента скорости сдвига. Диапазон изменений градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ (второй режим)

Таблица 3 – Сводная таблица параметров динамической вязкости и напряжения сдвига для диапазона градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ фильтрованного суслу

Температура, °С	Динамическая вязкость, Па·с	Напряжение сдвига, Па (градиент скорости 200 с ⁻¹)
20	0,0024	0,48
40	0,0015	0,30
60	0,0010	0,17
80	0,0008	0,14

Таблица 4 – Сводная таблица параметров динамической вязкости и напряжения сдвига для диапазона градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ для охмеленного суслу

Температура, °С	Динамическая вязкость, Па·с	Напряжение сдвига, Па (градиент скорости 200 с ⁻¹)
20	0,0025	0,50
40	0,0021	0,31
60	0,0014	0,26
80	0,0010	0,23

Как видно из представленного графического материала, в диапазоне градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ течение исследованных рабочих сред подчиняется ньютоновскому характеру течения. Кривые течения носят линейный характер (рисунки 7, 8), а графическая функция $\mu = f \cdot \dot{\gamma}$ (рисунки 9, 10) имеет вид горизонтальной прямой.

Также на рисунке 7 видно, что с увеличением температуры показатели напряжения сдвига уменьшились. Если, при 20 °С, максимальное значение напряжения сдвига равнялось 0,48 Па, то при 80 °С максимальное значение составляло 0,14 Па, т. е. напряжение сдвига уменьшилось в 3,42 раза. На рисунке 8 изображены кривые течения для образцов охмеленного суслу. Полученные уравнения регрессии также имеют линейный вид, что подтверждает принадлежность к ньютоновскому типу жидкости. Наибольшее напряжение сдвига при 20 °С составляло 0,50 Па, а при 80 °С – 0,23 Па, т. е. напряжение сдвига уменьшилось в 2,17 раза.

Для фильтрованного суслу наибольшее значение динамической вязкости составляло 0,0024 Па·с при 20 °С, наименьшее значение динамической вязкости составляло 0,0008 Па·с для 80 °С, т. е. уменьшилось в 3 раза. Для охмеленного суслу наибольшее значение динамической вязкости составляло 0,0025 Па·с при 20 °С и 0,0010 Па·с при 80 °С, т. е. уменьшилось в 2,5 раза. Результаты экспериментов, выполненные в первом и втором режимах, представлены в таблицах 1–4 с уравнениями регрессии и искоэффициентами детерминации (таблицы 1, 2), с численными значениями коэффициентов динамической вязкости и напряжений сдвига (таблицы 3, 4).

рессии и искоэффициентами детерминации (таблицы 1, 2), с численными значениями коэффициентов динамической вязкости и напряжений сдвига (таблицы 3, 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подобраны оптимальные режимы работы на ротационном вискозиметре. Как показывают опыты, применение диапазона градиента скорости от 10 с⁻¹ до 1000 с⁻¹ дает некорректное представление о типе жидкости, а также завышенные значения динамической вязкости и напряжения сдвига, что приводит к неправильной оценке гидравлических сопротивлений. Использование диапазона градиента скорости от 100 с⁻¹ до 200 с⁻¹ является более обоснованным режимом и рекомендован нами для изучения реологических свойств фильтрованного и охмеленного суслу, при использовании вискозиметров ротационного вида.

2. В работе исследованы реологические свойства фильтрованного и охмеленного суслу. Как показывают экспериментальные данные, для фильтрованного суслу напряжение сдвига при увеличении температуры с 20 °С до 80 °С уменьшается в 3,42 раза, а динамическая вязкость в 3 раза. Для охмеленного суслу напряжение сдвига при увеличении температуры с 20 °С до 80 °С уменьшается в 2,17 раз, а динамическая вязкость – в 2,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bamforth, C.W. Brewing : new technologies, Wood Head Publishing Limited / C.W. Bamforth. – Cambridge, 2006.
2. Bozikova, M. Comparison of thermophysical and rheologic properties of different light beers / M. Bozikova, P. Hlavac // Journal of Processing and Energy in Agriculture. – 2011. – 15 (1). – P. 6–11.
3. Hlavac, P. Dependencies of light brew rheologic properties on various parameter / P. Hlavac // Journal of Processing and Energy in Agriculture. – 2009. – 13 (4). – P. 295–297.
4. Hlavac, P. Temperature and time of storing dependencies of dark beer rheologic properties / P. Hlavac // Journal of Processing and Energy in Agriculture. – 2008. – 12 (3). – P. 14–17.
5. Severa, L. On the influence of temperature, on dynamic viscosity of dark beer, Acta of Mendel

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВАННОГО И ОХМЕЛЕННОГО СУСЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ

University of Agriculture and Forestry / L. Severa, J. Los. – Brno, 2008. – 56 (2). – P 303–307.

6. On the rheological profile of sweet wort during processing of substrate for lager beer / L. Severa [et al.] // Journal of Food Physics. – 2009. – 22 (2). – P. 5–16.

7. Jonkova, G. Impact of polysaccharides of malt on filterability of beer and possibilities for their reduction by enzymatic additives / G. Jonkova, A. Surleva // Journal of chemical Technology and Metallurgy. – 2013. – 48 (3). – P. 234–240.

8. Travnicek, P. Comparison of rheological properties of hopped wort and malt wort / P. Travnicek, J. Los, P. Junga // Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. – 2015. – 63 (1). – P. 131–136.

9. Исследование реологических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе измельченного солода / А.Г. Новоселов [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО ; Серия : процессы и аппараты пищевых производств. – 2015. – (4). – P. 83–90.

10. Новоселов, А.Г. Анализ реологических свойств водно-зерновых суспензий на основе ячменного солода / А.Г. Новоселов, Ю.Л. Малахов // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2017. – 17 (1). – P. 34–37.

11. Шрам, Г. Основы практической реологии и реотметрии : пер. с англ. И.А. Лавыгина / Под ред. В.Г. Куличихина. – М. : «Колосс», 2003. – 194 с.

Темершин Дмитрий Дмитриевич, аспирант, Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра процессов и аппаратов пищевых производств, тел.: 8 960-231-54-47, e-mail: dima-lestreyd@mail.ru.

Новоселов Александр Геннадьевич, д.т.н., профессор Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра процессов и аппаратов пищевых производств, тел.: 8 921-900-83-35, e-mail: dekrosh@mail.ru.

Гуляева Юлия Николаевна, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский университета информационных технологий, механики и оптики, кафедра процессов и аппаратов пищевых производств, тел.: 8 921-639-23-47, e-mail: gulyaeva.yul@yandex.ru.

Рогожин Евгений Вячеславович, магистрант, Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра процессов и аппаратов пищевых производств, e-mail: Rogozhinevgeny@gmail.com.