

УДК 637.143

Исследование реологических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе измельченного солода

Д-р техн. наук А.Г. Новоселов, dekrosh@mail.ru

Ю.Л. Малахов, yma@sopura.com

А.В. Степаненко, aise7@rambler.ru

канд. техн. наук Ю.Н. Гуляева, gulyaeva.yul@yandex.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Проводили реологические исследования солодовенных суспензий и сравнивали полученные значения коэффициентов динамической вязкости с аналогичными коэффициентами ячменных суспензий. Показано, что солодовенные суспензии имеют более низкие значения коэффициентов динамической вязкости при сопоставимых условиях проведения эксперимента. Выполнена систематизация массива экспериментальных данных, заключающаяся в выделении на вязкостно-температурных кривых трех характерных зон, разделенных друг от друга четырьмя реперными точками: начало процесса измерений при температуре 25°C с коэффициентом динамической вязкости $\mu_{нач}$; минимальное значение коэффициента динамической вязкости $\mu_{мин}$; максимальное значение коэффициента динамической вязкости $\mu_{макс}$; конечное значение коэффициента динамической вязкости $\mu_{кон}$. Представлены математические зависимости, дающие возможность прогнозировать изменение коэффициентов динамической вязкости при изменении их количественного состава, температуры и скорости сдвига. Отмечается, что у солодовых суспензий, при скоростях сдвига менее 234 с⁻¹ наблюдалось наличие минимального значения коэффициента динамической вязкости, а затем, в течение некоторого периода времени, увеличение его значения.

Ключевые слова: солодовая суспензия; коэффициент динамической вязкости; пивоваренное производство; реперные точки.

DOI: 10.17586/2310-1164-2016-9-4-83-90

Rheological properties of water-grain suspensions on the basis of crushed malt

D.Sc. Aleksandr G. Novoselov, dekrosh@mail.ru

Yuri L. Malakhov, yma@sopura.com

Anastasiya V. Stepanenko, aise7@rambler.ru

Ph.D. Juliya N. Gulyaeva, gulyaeva.yul@yandex.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article demonstrates the results of experiments with the rheological properties of malting suspensions and comparison of the received values for dynamic viscosity coefficient with the ones of barley suspensions. It is shown that malting suspensions have lower values of dynamic viscosity coefficients under comparable experimental conditions. The systematization of the array of experimental dates is made. The dates concerns the selection of three characteristic zones on the viscosity-temperature curves, separated by four reference points from each other: the beginning of the measurement process at the temperature of 25°C and dynamic viscosity coefficient $\mu_{нач}$; the lowest value of dynamic viscosity coefficient $\mu_{мин}$; the highest value of dynamic viscosity coefficient $\mu_{макс}$; the final value of dynamic viscosity coefficient $\mu_{кон}$. The mathematical relations giving the opportunity to predict the change of dynamic viscosity coefficient given the change of their numerical composition, temperature, and sliding velocity are given. It is shown that, if the sliding velocity is less than 234 с⁻¹, malting suspensions have the lowest value of dynamic viscosity coefficient and then this value increases in course of time.

Keywords: malt suspension; dynamic viscosity coefficient; brewery; reference points.

Введение

Совершенствование процессов и аппаратов таких биотехнологических производств, как пивоваренные заводы является важнейшей научно-технической задачей, которая напрямую связана с созданием современных предприятий, оснащенных высокоэффективным технологическим оборудованием. Важнейшим условием для этого является наличие на российском рынке универсального оборудования, позволяющего осуществлять несколько стадий технологического процесса, что значительно снизит капитальные затраты на создание машинно-аппаратурных схем, упростит управление технологическим процессом, сделав его более гибким в плане внедрения новых видов продукции.

В связи с этим встает задача разработки нового технологического оборудования, позволяющего реализовать концепцию универсальности последовательного его применения в нескольких технологических стадиях.

Разработка конструкции любого нового технологического оборудования, предназначенного для переработки твердого крахмалосодержащего сырья в целевой продукт, неизбежно связана с системным проведением научных исследований в области реологии, гидродинамики, тепло- и массообмена.

Анализ работ [1–3], ведущихся в этом направлении показал, что наиболее энергозатратными процессами в машинно-аппаратурных схемах производства пива являются стадии затирания солода и варки суслу или, другими словами, водно-тепловой и ферментативной обработки зернового сырья. Это одна из важнейших технологических стадий производства пива, заключающаяся в подготовке питательной среды к проведению процесса брожения, от эффективности которого во многом зависит производительность пивоваренных заводов и качество целевого продукта.

В настоящее время основным сырьем в пивоваренном производстве является ячменный солод, который представляет собой искусственно пророщенный и высушенный ячмень [4, 5].

Одной из главных целей производства солода из природного зернового ячменя является образование и накопление ферментов, образующихся в процессе проращивания. К таким ферментам, представляющим особый интерес с точки зрения формирования технологии производства пива на стадии затирания, относятся: ферменты амилолитического действия, а именно α - и β -амилазы, которые расщепляют крахмал до сбраживаемых сахаров; цитолитические ферменты – гемицеллюлазы и β -глюконаза, расщепляющие стенки клеток эндосперма; протеолитические ферменты, расщепляющие белок; липазы – ферменты, расщепляющие жиры. При проращивании ячменного зерна невозможно отделить процесс образования ферментов от их потребления самим растительным организмом зерна. Более того, фермент α -амилаза в ячменном зерне практически отсутствует, а его активный синтез и накопление начинается в процессе проращивания. Обычно синтез α -амилазы начинается со второго дня проращивания и при дальнейшем проведении этой стадии фермент начинает накапливаться в зерне. При проращивании содержание крахмала в ячменном зерне уменьшается, а доля сбраживаемых сахаров увеличивается [6]. Таким образом, следует предположить, что наличие ферментов амилолитического действия в водно-зерновых суспензиях, приготовленных на основе ячменного солода, будет существенно влиять на вязкость суспензий.

Цель данной работы – проведение реодинамических исследований водно-зерновой (солодовой) суспензии и сравнение характеристик водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе непорощенного ячменного зерна, с приготовленными на основе ячменного солода, с целью получения коэффициентов динамической вязкости для возможности проведения гидродинамических расчетов кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата.

Экспериментальная часть

Ранее нами были проведены комплексные экспериментальные исследования реодинамических характеристик водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе непорощенного ячменного зерна [7, 8]. Эксперименты проводились с изменением скоростей сдвига равных $\dot{\gamma}_1 = 2,04 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_2 = 4,08 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_3 = 6,12 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_4 = 8,16 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_5 = 16,32 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_6 = 26,52 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_7 = 48,96 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_8 = 81,6 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_9 = 146,88 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{10} = 234,6 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{11} = 436,56 \text{ c}^{-1}$.

Изменение температуры суспензии для всех опытов проводилось в диапазоне от 20 до 90°C. Время проведения каждого эксперимента составляло 2000 с. Были исследованы следующие гидромодули: 1:4; 1:3,5; 1:3; 1:2,5.

Анализ полученных результатов показал, что водно-зерновые суспензии, приготовленные на основе ячменного зерна, обладают высокими значениями коэффициентов динамической вязкости, особенно для малых значений гидромодулей (1:3 и 1:2,5). Например, для гидромодуля 1:2,5 значение коэффициента динамической вязкости μ при температуре суспензии 20°C и скорости сдвига $\dot{\gamma} = 2,04 \text{ c}^{-1}$ равно 13 Па·с, а максимальное значение коэффициента динамической вязкости при температуре 85°C и той же скорости сдвига равнялось 39 Па·с. Такая зависимость прослеживалась для всех исследованных гидромодулей водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе ячменного зерна [9, 10]. Характер изменения значений коэффициента динамической вязкости от температуры для различных гидромодулей представлен на рисунке 1.

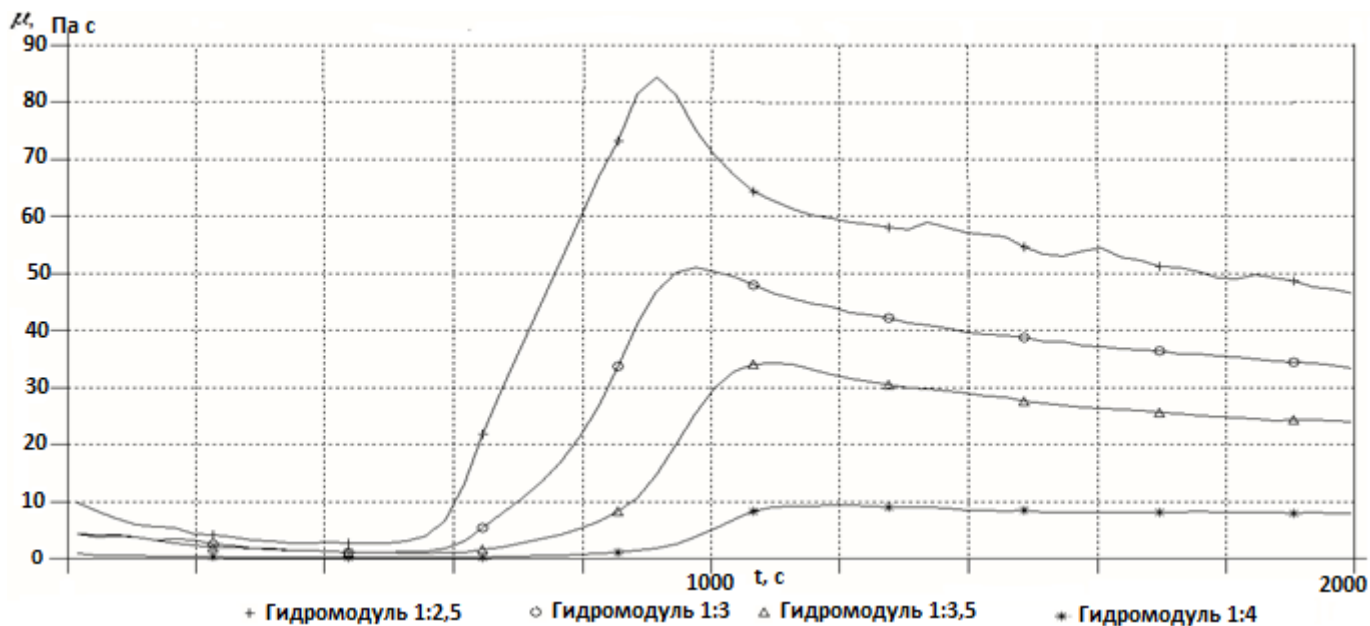


Рисунок 1 – Изменение коэффициента динамической вязкости водно-зерновых суспензий с различными гидромодулями в процессе их нагрева при скорости сдвига $\dot{\gamma} = 16,32 \text{ c}^{-1}$

Полученные графические зависимости позволили в некоторой степени систематизировать результаты измерений, которые легли в основу их последующей математической обработки. Систематизация заключалась в следующем. Каждая вязкостно-температурная кривая разбивалась на три зоны, в соответствии с характером поведения изменения линии, обобщающей экспериментальные точки, рисунок 2.

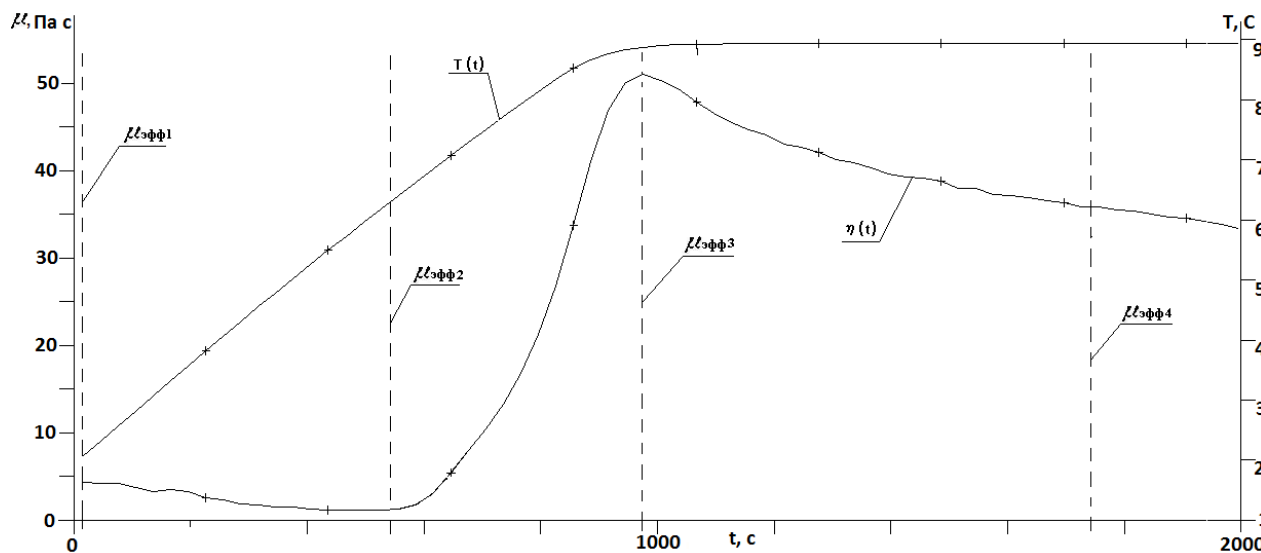


Рисунок 2 – Изменение коэффициента динамической вязкости водно-зерновой суспензии (вода – измельченное ячменное зерно) в диапазоне температур 20÷90°C (гидромодуль 1:3)

Границы каждой зоны определялись четырьмя реперными точками:

- 1 – начало процесса измерений при температуре 25°C и коэффициентом динамической вязкости $\mu_{\text{нач}}$;
- 2 – минимальное значение коэффициента динамической вязкости $\mu_{\text{мин}}$;
- 3 – максимальное значение коэффициента динамической вязкости $\mu_{\text{макс}}$;
- 4 – конечное значение коэффициента динамической вязкости $\mu_{\text{кон}}$.

Между реперными точками 1 и 2 располагается первая зона вязкостно-температурной кривой. Она характеризуется нисходящей линией, т.е. уменьшением значений коэффициента динамической вязкости, свидетельствуя то, что на начальном этапе в водно-зерновой суспензии только начинаются процессы перехода растворимых веществ, содержащихся в ячменном зерне, в воду. Суспензия представляет собой двухфазную смесь (жидкость – твердое вещество), постепенно меняющую химический состав воды и, как следствие, ее вязкость. Значение коэффициента динамической вязкости суспензии в первой зоне определяется результирующим эффектом одновременного теплового воздействия на нее и интенсивностью процесса растворения. В результате повышения температуры вязкость воды снижается, но в результате изменения химического состава воды вязкость повышается. Такая тенденция наблюдается до того момента, пока значение коэффициента динамической вязкости не достигнет своего минимального значения для данного гидромодуля, т.е. значения $\mu_{\text{мин}}$.

С этого момента (реперная точка 2) начинается активный процесс трансформации нативного крахмала в водорастворимые углеводы. Трансформация нативного крахмала заключается в его клейстеризации и разжижении. Процесс клейстеризации заключается в том, что в молекулах крахмала накапливается вода, приводящая к резкому набуханию крахмальных зерен. Это приводит к резкому увеличению объема твердой фазы, снижению ее механической прочности и, как следствие, разрыву твердых зерен крахмала. Вязкость суспензии начинает резко возрастать за счет изменения структуры двухфазной смеси, которая из классической структуры суспензии превращается в гелеобразную. По мере протекания процесса клейстеризации крахмала увеличивается значение коэффициента динамической вязкости двухфазной смеси до момента достижения ее максимального значения $\mu_{\text{макс}}$ (реперная точка 3). Изменение значений коэффициента динамической вязкости во второй зоне характеризуется восходящим отрезком на вязкостно-температурной кривой (рисунок 2). Следует отметить, что для каждого гидромодуля водно-зерновой суспензии, приготовленного на основе ячменного зерна, были получены вполне определенные значения $\mu_{\text{макс}}$ и даны уравнения для их расчета [7]. После достижения реперной точки 3 значение коэффициента динамической вязкости начинает постепенно уменьшаться, при этом температура суспензии остается постоянной и равной 90°C. Это говорит о том, что клейстеризованный крахмал зерна постепенно начинает разжижаться. Возможно, сказывается действие β -амилазы, которая в отличие от α -амилазы присутствует в ячменном зерне [6]. Изменение значений коэффициента динамической вязкости в третьей зоне характеризуется нисходящим отрезком на вязкостно-температурной кривой, ограниченным с одной стороны реперной точкой 3 и некоторым средним значением $\mu_{\text{кон}}$, соответствующим реперной точке 4 (рисунок 2).

Описание экспериментальной установки

Исследование реодинамических характеристик водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе солода, проводилось на экспериментальном стенде, представленном на рисунке 3.

Экспериментальный стенд для определения реодинамических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе измельченного солода, состоял из ультратермостата – 1, блока управления вискозиметром – 2, ротационного вискозиметра (реотеста) марки RHEOTEST® RN 4.1 SE – 3, персонального компьютера – 4.

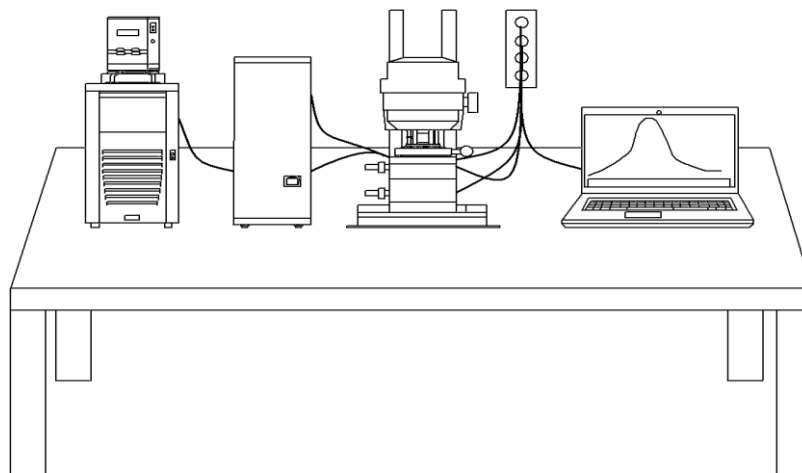


Рисунок 3 – Экспериментальный стенд для определения реологических свойств водно-зерновых суспензий:
1 – ультратермостат; 2 – блок управления реотестом; 3 – ротационный вискозиметр RHEOTEST® RN 4.1 SE; 4. – персональный компьютер

Методика проведения эксперимента

Подготовка зерновой суспензии проводилась следующим образом. Сухой солод измельчался на ротационной ножевой дробилке РМ-120 с разгрузочной решеткой, имеющей отверстия 2 мм. Затем измельченный солод отсеивали через сито с отверстиями 1 мм и полученный материал использовали для приготовления суспензии.

Далее на лабораторных весах марки ВЛТЭ-150 взвешивались навески измельченного солода в количестве согласно исследуемому гидромодулю. Для достижения указанных гидромодулей в лабораторный стакан в заданной пропорции вносилось соответствующее количество воды и зерна. Предварительно вода термостатировалась до начальной температуры исследований $T_{\text{нач}} = 20^{\circ}\text{C}$. В течение короткого времени (примерно 3 минут) исследуемый образец тщательно перемешивался. Затем, в количестве 30 мл исследуемый образец помещался в измерительный стакан, который перед заполнением был тщательно очищен и просушен вместе с измерительным цилиндром, а также термостатирован до начальной температуры образца.

Эксперименты проводились с изменением скоростей сдвига равных $\dot{\gamma}_1 = 2,04 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_2 = 4,08 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_3 = 6,12 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_4 = 8,16 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_5 = 16,32 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_6 = 26,52 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_7 = 48,96 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_8 = 81,6 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_9 = 146,88 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{10} = 234,6 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{11} = 436,56 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{12} = 600 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{13} = 800 \text{ c}^{-1}$ и $\dot{\gamma}_{14} = 1000 \text{ c}^{-1}$. Изменение температуры суспензии для всех опытов проводилось в диапазоне от 20 до 90°C. Время проведения каждого эксперимента составляло 2000 с. Были исследованы следующие гидромодули: 1:6; 1:4; 1:3,5; 1:3; 1:2,5.

Изменение значений коэффициента динамической вязкости μ для всех исследованных гидромодулей солодовой суспензии при скорости сдвига $\dot{\gamma} = 146,88 \text{ c}^{-1}$ представлено на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, характер изменения коэффициента динамической вязкости солодовой суспензии несколько отличен от характера изменений коэффициента динамической вязкости суспензии, приготовленной на основе ячменного зерна.

Во-первых, значения коэффициента динамической вязкости в первых трех реперных точках вязкостно-температурной кривой, полученной для солодовой суспензии, значительно ниже, чем в соответствующих точках аналогичной кривой для ячменной суспензии. Во-вторых, изменение значений коэффициента динамической вязкости в 4-ой зоне носит более сложный характер и зависит от скорости сдвига. В частности, при низких скоростях сдвига для всех исследованных гидромодулей водно-солодовой суспензии в 4-ой зоне отмечалось наличие минимального значения коэффициента динамической вязкости, а затем в течение некоторого периода времени увеличение его значения.

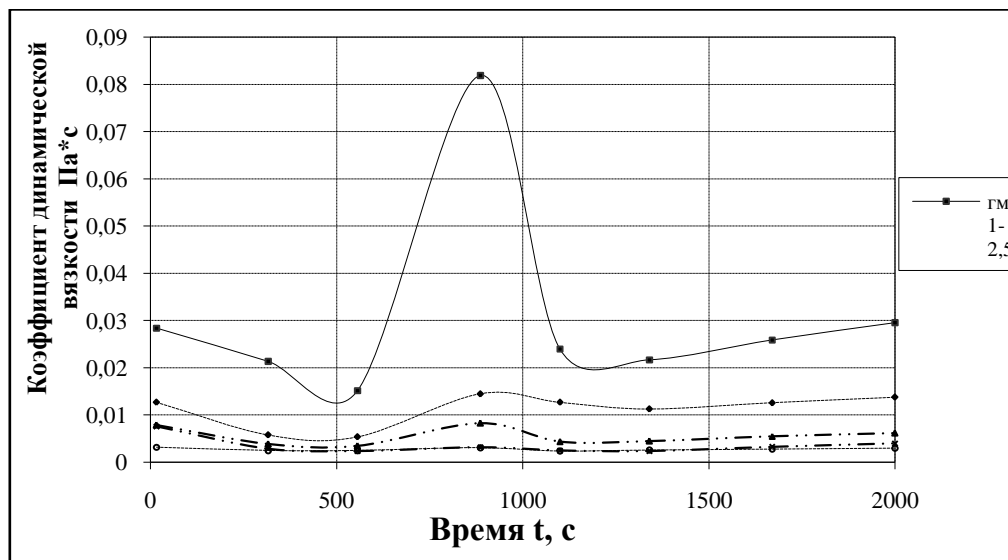


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента динамической вязкости солодовой суспензии от температуры для всех исследованных гидромодулей в диапазоне температур 20÷90°С при скорости сдвига $\dot{\gamma} = 146,88 \text{ c}^{-1}$

Характер такого изменения можно проследить на рисунке 4. С увеличением скорости сдвига интенсивность возрастания вязкости солодовой суспензии вырождается и при $\dot{\gamma} = 234,6 \text{ c}^{-1}$ и выше значение $\mu_{\text{кон}}$ остается постоянным по величине для соответствующего гидромодуля. Можно предположить, что на такое поведение вязкостно-температурной кривой оказывает влияние гидродинамическая обстановка в рабочем объеме ячейки реостата. Очевидно, что локальные скорости движения жидкостной фазы, движущейся в зазоре измерительной ячейки, оказывают силовое воздействие на частицы измельченного зерна. При малых скоростях сдвига процесс разрушения молекулярных связей зерновой частицы и воды происходит медленнее, чем при больших скоростях. Учитывая различный размер твердых частиц, их разжижение происходит с различной скоростью. Более мелкие частицы, как правило, состоящие из крахмальных зерен разжижаются быстрее, более крупные на данный момент еще продолжают разжижаться. Так как время проведения эксперимента фиксировано и равно 2000 с, то возможно, процесс разжижения крупных агломератов крахмальных зерен не успевает произойти. При больших скоростях сдвига, соответствующих большим локальным скоростям движения жидкостной составляющей суспензии, процесс разжижения ускоряется и, как видно из графиков, представленных на рисунках 5 и 6, заканчивается в течение времени эксперимента.

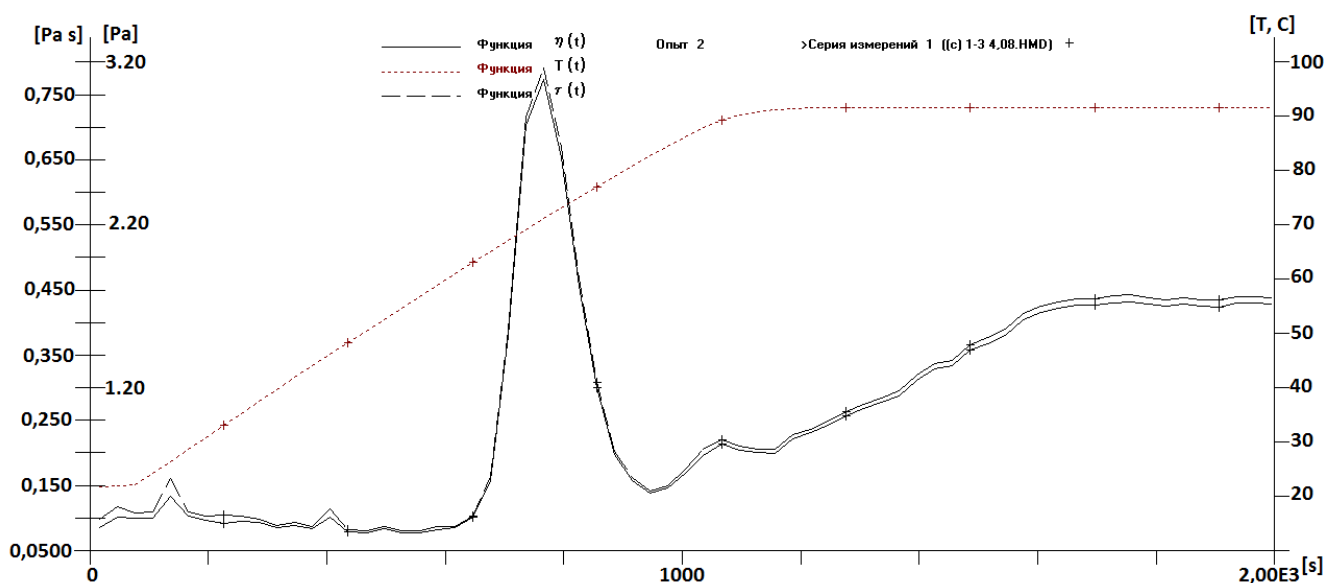


Рисунок 5 – Вязкостно-температурная кривая водно-солодовой суспензии: гидромодуль 1:3; скорость сдвига $4,08 \text{ c}^{-1}$

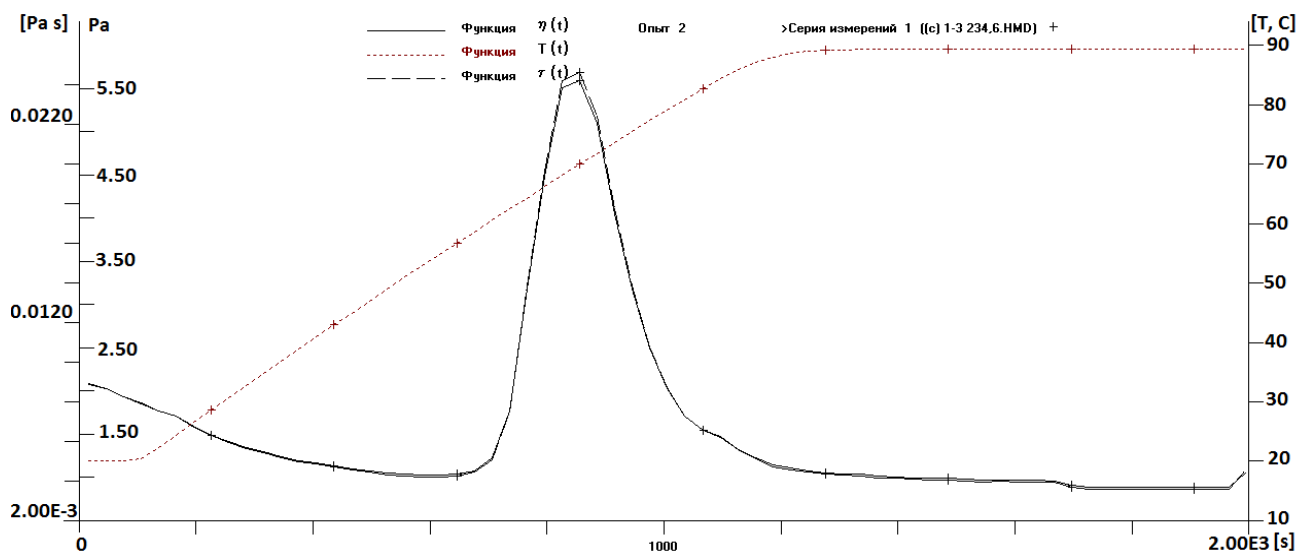


Рисунок 6 – Вязкостно-температурная кривая водно-солодовой суспензии: гидромодуль 1:3; скорость сдвига 234,6 с⁻¹

Наличие минимального значения коэффициента вязкости в четвертой зоне (рисунки 5 и 6) на данном этапе объяснить не представляется возможным и требует отдельных экспериментов и анализа полученных результатов.

Заключение

Обработка полученных результатов по измерению коэффициентов динамической вязкости водно-солодовой суспензии на данном этапе, позволила получить следующие математические зависимости для их расчета в соответствующих реперных точках, кроме значений коэффициентов вязкости в четвертой реперной точке (таблица).

Таблица – Математические зависимости для расчета коэффициентов динамической вязкости

Гидромодуль	Первая точка	Вторая точка	Третья точка
1–2,5	$\mu = 162,48\gamma^{-0,043}$	$\mu = 33,397\gamma^{0,0955}$	$\mu = 134,14\gamma^{0,387}$
1–3	$\mu = 0,1636\gamma^{-0,45}$	$\mu = 0,2061\gamma^{-0,614}$	$\mu = 1,6241\gamma^{-0,759}$
1–3,5	$\mu = 0,0532\gamma^{-0,313}$	$\mu = 0,0923\gamma^{-0,519}$	$\mu = 1,3855\gamma^{-0,796}$
1–4	$\mu = 0,0656\gamma^{-0,401}$	$\mu = 0,0572\gamma^{-0,477}$	$\mu = 0,7929\gamma^{-0,781}$

Полученные значения коэффициентов динамической вязкости для трех реперных точек, особенно для второй, позволят проводить гидродинамические расчеты кожухотрубного струйно-инжекционного аппарата, предполагаемого для проведения процесса затирания и варки суслу [10; 11].

Литература

1. Тишин В.Б., Большаков В.В., Никитин И.А. Затирание солодового помола в аппарате с внешним циркуляционным контуром и выносным теплообменником // Пиво и напитки. 2008. № 4. С. 34–36.
2. Оганнисян В.Г., Тишин В.Б., Меледина Т.В., Прохорчик И.П. Сравнительная оценка варочного оборудования для минипивоварен // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 4(18).
3. Ибрагимов Т.С. Совершенствование машинно-аппаратурной схемы производства этилового спирта: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 94 с.
4. Меледина Т.В., Прохорчик И.П., Кузнецова Л.И. Биохимические процессы при производстве солода: учебное пособие. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2013. 89 с.
5. Нарцисс Л. Краткий курс пивоварения. СПб.: Профессия, 2007. 640 с.
6. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива. СПб.: Профессия, 2001. 912 с.

7. Чеботарь А.В. Совершенствование спиртовых производств на основе экспериментальных исследований реологии и гидродинамики водно-зерновых суспензий в трубах технологических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 132 с.
8. Чеботарь А.В., Новоселов А.Г., Петрова Н.Л. Исследование влияния амилолитических ферментов на вязкость водно-зерновой суспензии в процессе водно-тепловой обработки ферментативной обработки ячменного зерна // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 1(17). С. 183–187.
9. Ибрагимов Т.С., Чеботарь А.В., Новоселов А.Г. 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. С. 30
10. Чеботарь А.В., Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н. Течение водно-зерновых суспензий в трубах. Реологические характеристики водно-зерновых суспензий и их изменение в процессе водно-тепловой обработки // Материалы IV Междунар. научн.-практ. конф. «Инновационные пищевые технологии в области хранения и переработки сельскохозяйственного сырья» (Краснодар, 22–23 мая 2014 г.). Краснодар: Пищевая промышленность, 2014. С. 264–269.
11. Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Матевосов Т.С. Гидродинамика трехфазных потоков в вертикальных трубах при струйном диспергировании газовой фазы // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 4. С.106–115.

References

1. Tishin V.B., Bol'shakov V.V., Nikitin I.A. Zatiранie solodovogo pomola v apparate s vneshnim cirkulyacionnym konturom i vynosnym teploobmennikom [Mashing Malt grinding in the machine with an external circulation loop and the external heat exchanger]. *Beer & beverages*, 2008, no. 4, pp. 34–36.
2. Ogannisyan V.G., Tishin V.B., Meledina T.V., Prohorchik I.P. Sravnitel'naya ocenka varochnogo oborudovaniya dlya minipivovaren [Comparative evaluation of cooking equipment for microbreweries]. *Scientific Journal ITMO University. Series: Processes and food production equipment*. 2013, no. 4(16).
3. Ibragimov T.S. Sovershenstvovanie mashinno-apparaturnoj skhemy proizvodstva ehtilovogo spirta [Improving computer-hardware circuits ethanol production]. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, 2014, 94 p.
4. Meledina T.V., Prohorchik I.P., Kuznecova L.I. *Biohimicheskie processy pri proizvodstve soloda* [Biochemical processes in the production of malt]. Tutorial. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2013, 89 p.
5. Narciss L. *Kratkij kurs pivovareniya* [A short course of brewing]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2007, 640 p.
6. Kuncе V., Mit G. *Tekhnologiya soloda i piva* [Malt and beer technology]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2001, 912 p.
7. Chebotar' A.V. Sovershenstvovanie spirtovyh proizvodstv na osnove ehksperimental'nyh issledovanij reo-i gidrodinamiki vodno-zernovyh suspenzij v trubah tekhnologicheskikh apparatov [Improving the production of alcohol based on experimental studies reo-hydrodynamics and water-grain slurries in pipes technological devices]. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, 2014, 132 p.
8. Chebotar' A.V., Novoselov A.G., Petrova N.L. Issledovanie vliyaniya amiloliticheskikh fermentov na vyazkost' vodno-zernovoj suspenzii v processe vodno-teplovoj obrabotki fermentativnoj obrabotki yachmennogo zerna [Investigation of the effect of amylolytic enzymes on the viscosity of the water-grain suspension in the water-heat treatment of enzymatic processing of barley grain]. *Scientific Journal ITMO University. Series: Processes and food production equipment*. 2014, no. 1(17), pp. 183–187.
9. Ibragimov T.S., Chebotar' A.V., Novoselov A.G. Harakternye osobennosti izmeneniya reologicheskikh svojstv vodno-zernovyh suspenzij v processe vodno-teplovoj i fermentativnoj obrabotki (VTFO) zernovogo syr'ya [Features change the rheological properties of aqueous suspensions of cereals in the water and heat and enzymatic treatment (HTPE) grain raw materials]. *Scientific Journal ITMO University. Series: Processes and food production equipment*. 2013, no.1, P. 30.
10. Chebotar' A.V., Novoselov A.G., Gulyaeva Yu.N. Tehenie vodno-zernovyh suspenzij v trubah. Reologicheskie harakteristiki vodno-zernovyh suspenzij i ih izmenenie v processe vodno-teplovoj obrabotki [During grain-water suspensions in pipes. The rheological characteristics of aqueous suspensions of cereals and their change during thermal processing of water]. *Proceedings 4th International Scientific Conference "Innovative food technology in the field of storage and processing of agricultural raw materials"* (Krasnodar, May 22–23, 2014). Krasnodar, Food industry Publ., 2014, pp. 264–269.
11. Novoselov A.G., Malahov YU.L., Matevosov T.S. *Gidrodinamika trekhfaznyh potokov v vertikal'nyh trubah pri strujnom dispergirovanii gazovoj fazy*. [Hydrodynamics-phase flow in vertical pipes at the gas phase is dispersed inkjet]. *Scientific Journal ITMO University. Series: Processes and food production equipment*. 2015, no. 4, pp.106–115.

Статья поступила в редакцию 16.11.2016