

Научная статья

УДК 66.098.4

DOI: 10.17586/2310-1164-2023-16-1-37-48

**Процессы молекулярного переноса в жидкостных питательных средах дрожжевой и пивной отраслях промышленности**  
**Часть 2. Исследование реологических свойств водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла**

А.Г. Новоселов<sup>1\*</sup>, Ю.Л. Малахов<sup>1</sup>, А.В. Чеботарь<sup>1</sup>, С.А. Сорокин<sup>1</sup>, И.В. Баранов<sup>1</sup>, Ю.Н. Гуляева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, \*agnovoselov@itmo.ru  
<sup>2</sup>НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) Военной академии МТО, Россия, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Изучали реологические свойства водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла с целью дальнейшего исследования свойств, характеризующих процессы переноса импульса, тепловой энергии и массы в жидких питательных средах. Объектом исследования были семь образцов водного раствора свекловичной мелассы с исходной концентрацией сухих веществ 77,7 масс.% и семь образцов концентрата пивного сусла с исходной концентрацией сухих веществ 81 масс.%. Диапазон изменения температуры составлял 10–70°C. Измерения вязкости указанных объектов проводились с помощью шарикового вискозиметра HÖPPLER® KF 3.2, а для высоковязких растворов на ротационном вискозиметре марки Rheotest RN 4.1. Установлено, что вязкость этих двух различных по способу получения состава питательных сред (свекловичная меласса и пивное сусло) имеет не только аналогичный характер изменения коэффициента динамической вязкости в зависимости от температуры и содержания растворимых сухих веществ, но и сопоставимый численный диапазон значений. Определены границы изменения градиента скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , в которых исследуемые объекты ведут себя как неньютоновские жидкости – от 1 до 100 с<sup>-1</sup>. Полученные результаты представляют интерес как с точки зрения фундаментальной науки о развитии теории жидкого состояния вещества, так и прикладной с позиций инженерных расчетов и проектирования биотехнологического оборудования.

**Ключевые слова:** реологические свойства; вязкость; водный раствор мелассы; концентрат пивного сусла; концентрация сухих веществ

Original article

**Molecular transfer processes in liquid nutrient media in the yeast and beer industries.**  
**2. Study of the rheological properties for aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort**

Alexander G. Novoselov<sup>1\*</sup>, Yuri L. Malahov<sup>1</sup>, Anastasiia V. Chebotar<sup>1</sup>, Sergey A. Sorokin<sup>1</sup>, Igor V. Baranov<sup>1</sup>, Yuliya N. Gulyaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russia, \*agnovoselov@itmo.ru  
<sup>2</sup>Research Institute Military Logistics Academy, St. Petersburg, Russia

**Annotation.** The article is a continuation of the research in the field of comprehensive study of the properties characterizing the processes of momentum, thermal energy, and mass transfer in liquid nutrient media of biotechnological production. Experimental studies of the rheological properties for liquid nutrient media have been conducted. Beet molasses with an initial concentration of dry substances (DS) of 77.7 wt.% and concentrated malt extract of beer wort with an initial concentration of DS 81 wt.% were selected as objects of research. The temperature variation range was 10 to 70°C. The viscosity of the mentioned objects was measured with a HÖPPLER® KF 3.2 ball viscometer and also for highly viscous solutions on a Rheotest RN 4.1 viscometer, as a result of which the graphical dependences on temperature and DS concentration, as well as the gradient of shear rate were obtained. It has been established that the viscosity of these two nutrient media (beet molasses and beer wort), different in the method of obtaining the composition, has not only a similar pattern of change in the dynamic viscosity coefficient depending on temperature and content of soluble solids, but also a comparable numerical range of values. The boundaries of variation for the shear rate gradient, in which the studied objects behave as non-Newtonian fluids, from 1 to 100s<sup>-1</sup>, have been determined. The results obtained are of interest both from the point of view of fundamental science about the development of the theory of the liquid state of matter and applied, in terms of engineering calculations and the design of biotechnological equipment.

**Keywords:** rheological properties; viscosity; molasses aqueous solution; beer wort concentrate; dry matter concentration

## Введение

Данная статья является продолжением научных исследований, направленных на комплексное изучение процессов переноса импульса, тепловой энергии и массы в питательных средах биотехнологических производств. Ранее авторами в работе [1] было изложено обоснование необходимости проведения таких изысканий и представлены экспериментальные результаты количественной оценки одной из важнейших динамических характеристик – плотности.

Полученные данные позволили связать технологический параметр, характеризующий содержание сухих веществ в водных растворах мелассы, а также водных растворов концентрата пивного сусла с физическим параметром, определяющим массу сухих веществ (СВ), находящихся в единице объема водного раствора, т. е. с плотностью  $\rho$ .

Сопоставление численных значений плотности водных растворов мелассы и концентрата пивного сусла при сравнимых величинах содержания СВ в них показало совпадение. Это позволило идентифицировать растворы мелассы и концентрата пивного сусла несмотря на то, что оба эти продукта производятся из разного исходного сырья: меласса является отходом сахарного производства, а пивное сусло – полуфабрикатом в процессе получения пивной продукции из зернового сырья. В первом случае водные растворы мелассы являются источником углеводного питания хлебопекарных дрожжей при их аэробном культивировании. Во втором случае пивное сусло с определенным содержанием СВ также является источником углеводного питания дрожжей как для аэробного культивирования при выращивании засевной биомассы, так и для анаэробного культивирования дрожжей при проведении бродильных процессов [2–5]. Таким образом, допуская, что обе эти питательные среды, полученные из различных сырьевых природных источников, в основном содержат моно- и олигосахариды, можно судить об их определенной идентичности, что подтвердилось сходимостью значений плотности при сопоставимой температуре и концентрациях СВ в растворах [1, рисунок 5].

Для более объективного подхода к развитию теории жидкого состояния вещества и прогнозирования его физических свойств необходимо получить значения коэффициентов динамической вязкости для широкого ряда температур и концентраций сухих веществ в исследуемых водных растворах, поскольку они востребованы специалистами, занимающимися проектированием рабочего оборудования (ферментаторами, пропеллерами и т.п.) и транспортно-трубопроводных систем. Учитывая факт, что пивное сусло является целевым веществом, на основе которого получают конечный продукт – пиво – в широком ассортименте плотностей, следует предположить существенное влияние СВ на его вязкостные свойства. Ряд исследований, выполненных авторами работ [6–10], подтверждает это предположение.

Цель данной работы – изучить реологические свойства водных растворов мелассы и концентрата пивного сусла в широком диапазоне изменения содержания растворимых сухих веществ и температуры. Результаты измерений позволяют уточнить идентичность молекулярного состава исследуемых жидкостей и, как следствие, идентичность их физических свойств, проявляющихся в условиях динамического воздействия на них, и в изменении численных значений коэффициентов динамической и кинематической вязкости в зависимости от изменения силового и температурного напряжения.

## Объекты исследований

Объектами исследований стали водные растворы свекловичной мелассы (образцы с содержанием СВ 16,2; 32,5; 40,2; 51,9; 60,2; 69,9 масс.%, включая концентрацию исходного объекта 77,7 масс.%) и концентрата пивного сусла (образцы с содержанием СВ 10,2; 20,6; 30,1; 40,3; 50,1; 59,6; 72,4; 81 масс.%, где 81 масс.% являлась начальной). Диапазон изменения температур составил для обоих объектов исследования от 10 до 70°C с дискретностью 10°C.

## Методика проведения экспериментов

Вязкость объектов исследования определялась шариковым вискозиметром HÖPPLER® KF 3.2 и ротационным вискозиметром Rheotest RN 4.1. (Германия).

Для измерения вязкости растворов всех исследованных концентраций использовался вискозиметр с падающим шариком HÖPPLER® KF 3.2. Перед каждым экспериментом проба, залитая в измерительную трубку вискозиметра, термостатировалась в течение 20 мин для достижения заданной температуры.

Каждый опыт при заданной температуре включал в себя пять измерений, по результатам которых определялось среднее время падения шарика в пробе, которое и подставлялось в расчетную формулу, приведенную в паспорте прибора.

Для образцов с высоким содержанием СВ проводились измерения вязкости на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1. Они осуществлялись в диапазонах изменения градиентов скоростей сдвига  $\dot{\gamma}$  от 1 до 500 с<sup>-1</sup>. Для каждого эксперимента в измерительную ячейку отбиралась проба объемом 30 мл. Затем объект исследования термостатировали в течение 20 мин для достижения заданной температуры. Эксперименты проводились при скоростях сдвига равных  $\dot{\gamma}_1 = 1$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_2 = 5$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_3 = 10$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_4 = 25$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_5 = 50$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_6 = 100$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_7 = 200$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_8 = 300$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_9 = 400$  с<sup>-1</sup>;  $\dot{\gamma}_{10} = 500$  с<sup>-1</sup>. Время одного эксперимента составляло 10 мин – по 1 мин на каждое значение скорости сдвига. Время каждого отдельного опыта составляло 60 с. Первые 30 с опыта отводились на стабилизацию режима течения в ячейке. Использование ротационного вискозиметра позволяло получить кривые течения объектов исследований и, тем самым, определить к какому классу они относятся: ньютоновских или неньютоновских жидкостей [5].

### Результаты исследований реологических свойств водных растворов мелассы

Результаты измерений динамической вязкости водных растворов мелассы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициент динамической вязкости  $\mu$  (Па·с) водных растворов свекловичной мелассы в зависимости от температуры и содержания сухих веществ

Table 1. Dynamic viscosity coefficient  $\mu$  (Pa·s) of beet molasses aqueous solutions depending on temperature and dry matter content

t, °C	Концентрация СВ, масс. %						
	16,2	32,5	40,2	51,9	60,2	69,9	77,7
10	$2,86 \cdot 10^{-3}$	$6,147 \cdot 10^{-3}$	$1,032 \cdot 10^{-2}$	$3,222 \cdot 10^{-2}$	$1,003 \cdot 10^{-1}$	2,35	38,4
20	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$4,356 \cdot 10^{-3}$	$7,073 \cdot 10^{-3}$	$1,983 \cdot 10^{-2}$	$5,781 \cdot 10^{-2}$	0,961	10,6
30	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$3,251 \cdot 10^{-3}$	$5,009 \cdot 10^{-3}$	$1,466 \cdot 10^{-2}$	$3,566 \cdot 10^{-2}$	0,448	4,81
40	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$2,432 \cdot 10^{-3}$	$3,756 \cdot 10^{-3}$	$1,028 \cdot 10^{-2}$	$2,285 \cdot 10^{-2}$	0,232	2,01
50	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,926 \cdot 10^{-3}$	$2,862 \cdot 10^{-3}$	$7,484 \cdot 10^{-3}$	$1,673 \cdot 10^{-2}$	0,079	0,89
60	$0,88 \cdot 10^{-3}$	$1,527 \cdot 10^{-3}$	$2,302 \cdot 10^{-3}$	$5,618 \cdot 10^{-3}$	$1,188 \cdot 10^{-2}$	0,049	0,46
70	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$1,334 \cdot 10^{-3}$	$1,598 \cdot 10^{-3}$	$4,319 \cdot 10^{-3}$	$8,643 \cdot 10^{-3}$	0,032	0,27

На основе данных, полученных в результате измерений, были построены следующие графические зависимости: кривые течения, вязкостно-температурные кривые и кривые зависимости коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига для растворов мелассы с концентрацией сухих веществ 60,2 и 69,9 масс.%, а также зависимости коэффициентов динамической вязкости от содержания сухих веществ при различных температурах.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига при различных температурах для растворов с концентрацией сухих веществ 60,2 и 69,9 масс.%. Как видно из графиков, данная зависимость является линейной и проходит через начало координат, что характеризует данные растворы мелассы как ньютоновские жидкости.

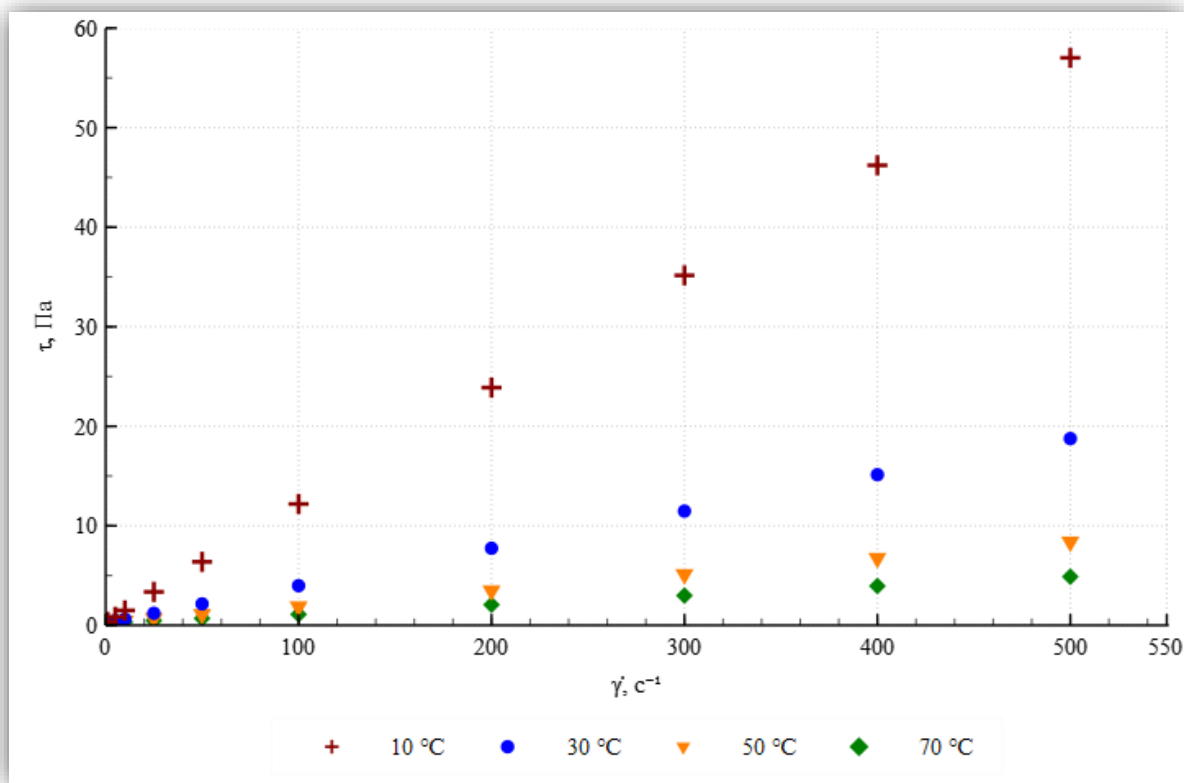


Рисунок 1 – Кривые течения водного раствора мелассы с концентрацией СВ 60,2 масс. % при различных температурах

Figure 1. Flow of molasses aqueous solution (dry matter content is 60.2%) at various temperatures

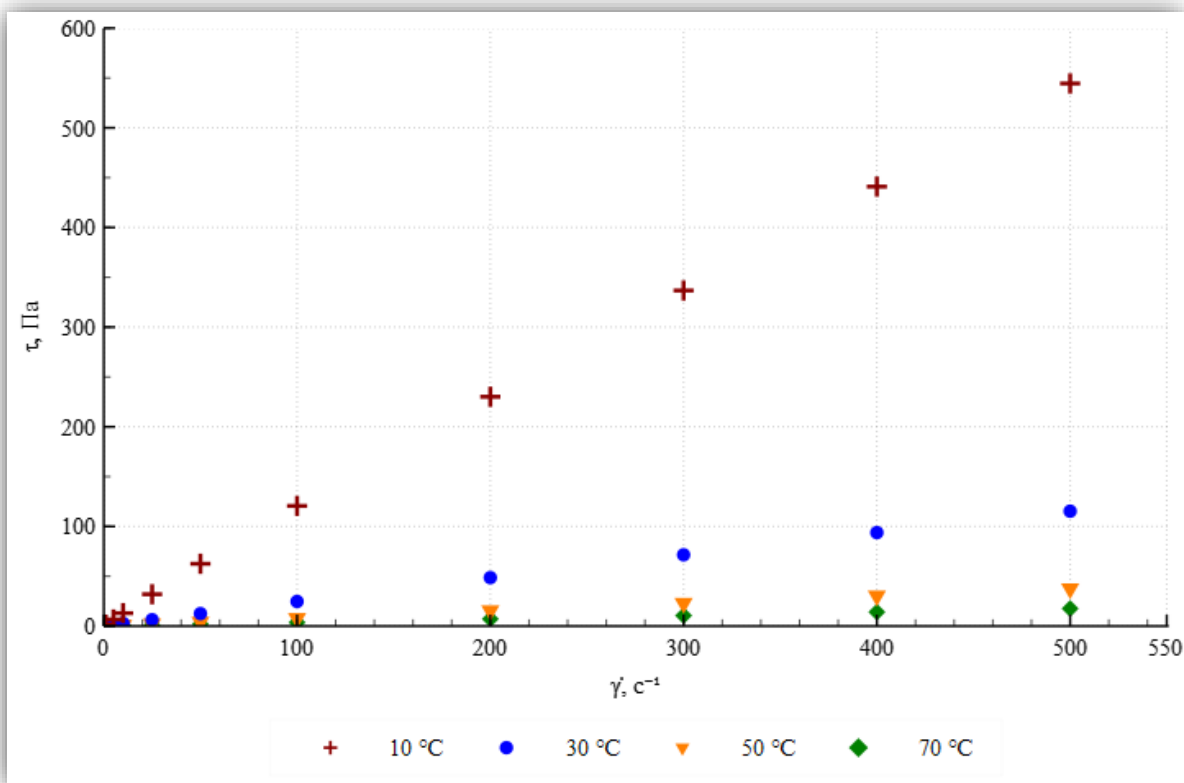


Рисунок 2 – Кривые течения водного раствора мелассы с концентрацией СВ 69,9 масс. % при различных температурах

Figure 2. Flow of molasses aqueous solution (dry matter content is 69.9%) at various temperatures

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости величины коэффициента динамической вязкости от температуры при различных скоростях сдвига. С ростом температуры вязкость мелассы снижается, что, в общем-то, закономерно.

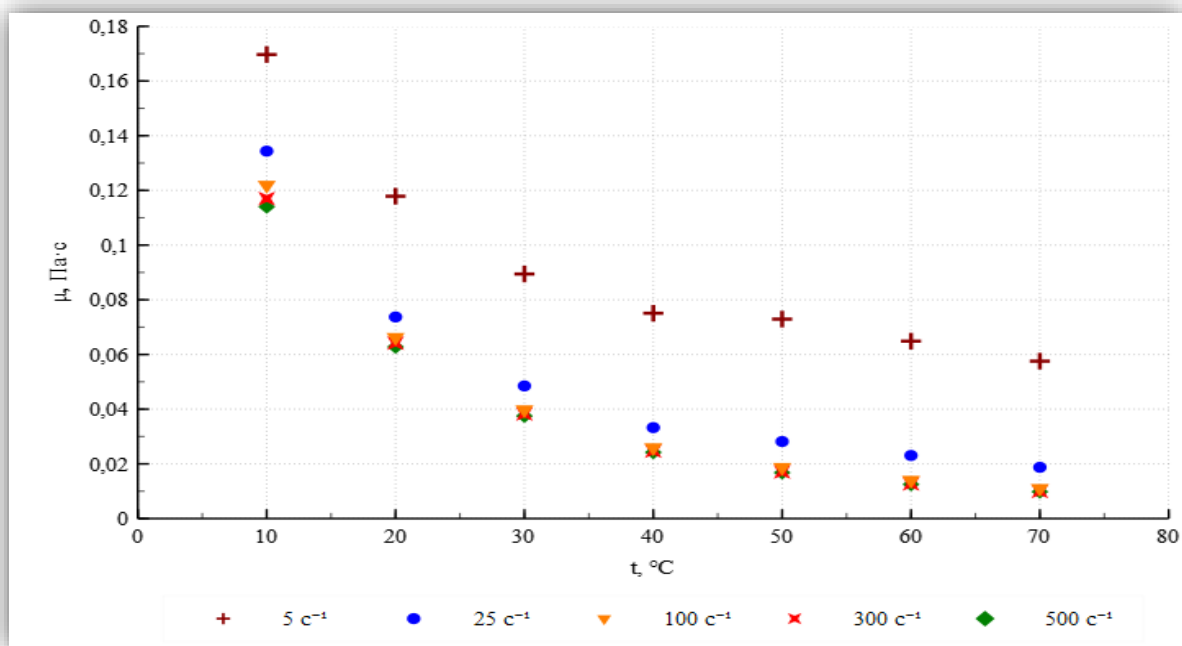


Рисунок 3 – Зависимость динамической вязкости водного раствора мелассы с концентрацией СВ 60,2 масс. % от температуры при различных скоростях сдвига

Figure 3. Dependence of dynamic viscosity for molasses aqueous solution (dry matter content is 60.2%) on temperature at various shear rates

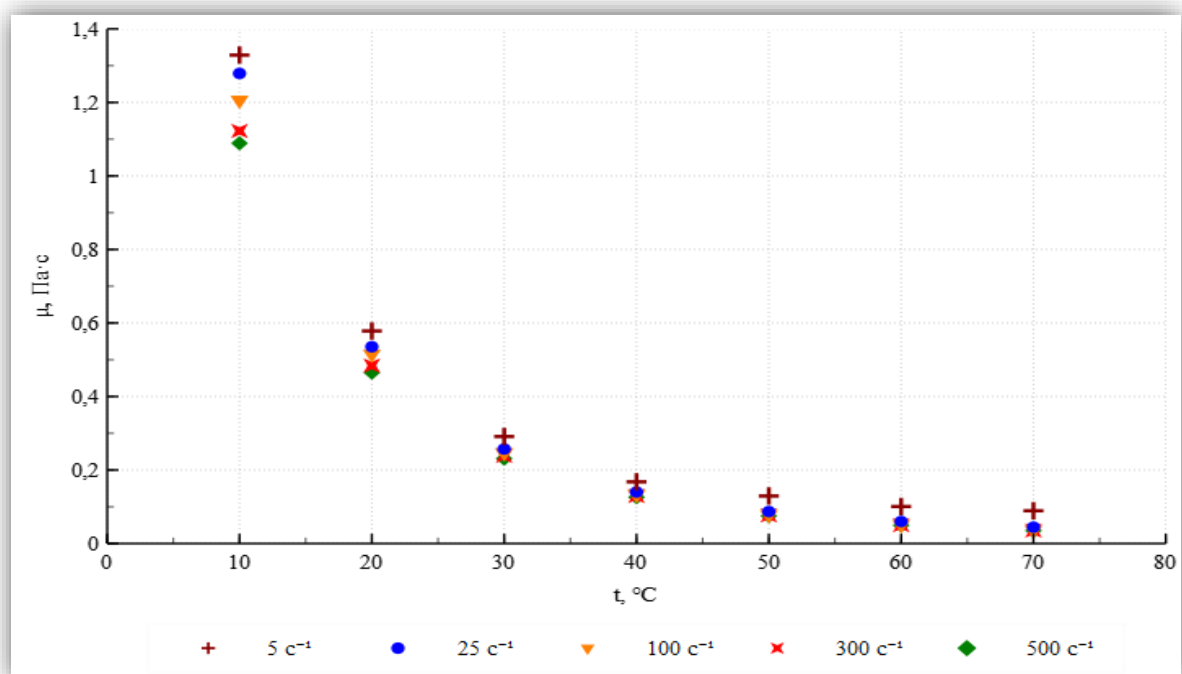


Рисунок 4 – Зависимость динамической вязкости водного раствора мелассы с концентрацией СВ 69,9 масс. % от температуры при различных скоростях сдвига

Figure 4. Dependence of dynamic viscosity for molasses aqueous solution (dry matter content is 69.9%) on temperature at various shear rates

Рисунки 5 и 6 иллюстрируют как изменяется вязкость водных растворов мелассы с содержанием СВ 60,2 и 69,9 масс.% с увеличением скорости сдвига при различных температурах. Установлено, что вязкость снижается с увеличением скорости сдвига от 1 до 100 с<sup>-1</sup>, при дальнейшем увеличении скорости сдвига значение коэффициента динамической вязкости остается практически постоянным. Таким образом, растворы при низких значениях скорости сдвига ведут себя как псевдопластичные жидкости, а при скоростях выше 100 с<sup>-1</sup> – как ньютоновские жидкости.

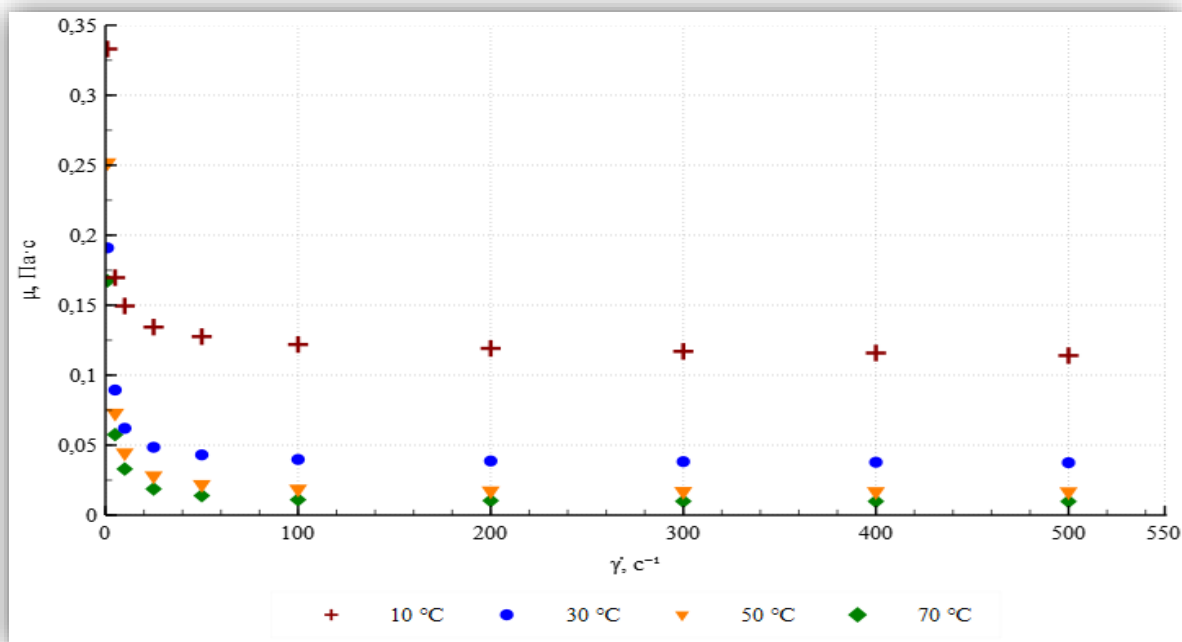


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента динамической вязкости раствора мелассы с концентрацией СВ 60,2 масс. % от скорости сдвига при различных температурах

Figure 5. Dependence of dynamic viscosity for molasses aqueous solution (dry matter content is 60.2%) on shear rate at various temperatures

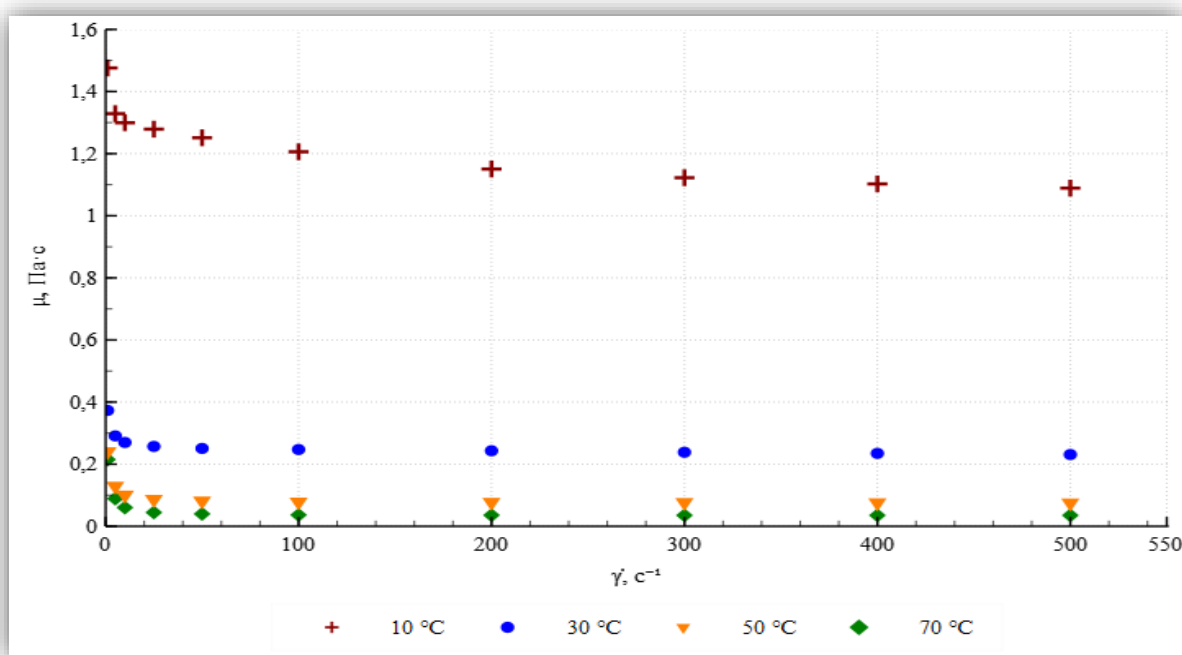


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента динамической вязкости раствора мелассы с концентрацией СВ 69,9 масс. % от скорости сдвига при различных температурах

Figure 6. Dependence of dynamic viscosity for molasses aqueous solution (dry matter content is 69.9%) on shear rate at various temperatures

На рисунке 7 представлена зависимость коэффициента динамической вязкости водных растворов мелассы от концентрации СВ при температуре 30°C в полулогарифмической системе координат. Вязкость растворов растет с увеличением концентрации СВ. Представленный график построен на основе данных, полученных в результате измерения вязкости растворов мелассы при помощи вискозиметра Гешплера. Кроме того, на график нанесены точки, характеризующие значение вязкости растворов с концентрацией СВ 60,2; 69,9 и 77,7% при температуре 30°C и скорости сдвига 300 с<sup>-1</sup>, полученные в результате измерений на ротационном вискозиметре. Таким образом, сопоставляя значения, полученные на данных приборах, можно сделать вывод, что они дают схожие, а следовательно, достоверные результаты.

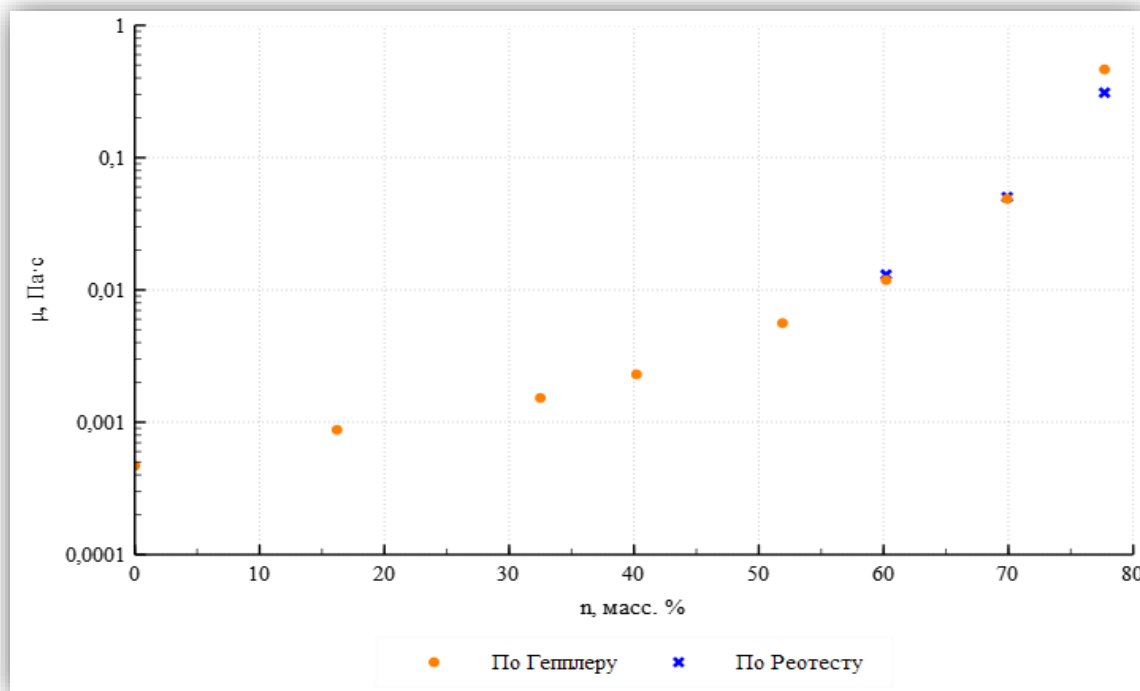


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента динамической вязкости от концентрации СВ водного раствора мелассы

Figure 7. Dependence of dynamic viscosity on dry matter content of molasses aqueous solution

Результаты измерений коэффициентов динамической вязкости и плотности водных растворов свекловичной мелассы позволили рассчитать значения коэффициентов кинематической вязкости для всех объектов исследования по уравнению

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Таблица 2. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu \cdot 10^6$  (м<sup>2</sup>/с) водных растворов свекловичной мелассы в зависимости от t и содержания СВ

Table 2. Cinematic viscosity coefficient  $\nu \cdot 10^6$  (m<sup>2</sup>/s) of beet molasses aqueous solutions depending on t and dry matter content

t, °C	Концентрация СВ, масс. %						
	16,2	32,5	40,2	51,9	60,2	69,9	77,7
10	2,68	5,39	8,71	25,84	78,03	1739,53	27517,52
20	2,00	3,83	5,99	15,99	45,06	713,51	7635,10
30	1,40	2,86	4,25	11,86	27,88	333,69	3463,11
40	1,11	2,15	3,20	8,34	17,95	173,43	1445,41
50	0,99	1,71	2,45	6,10	13,19	59,05	643,86
60	0,83	1,36	1,97	4,59	9,41	36,89	336,92
70	0,74	1,19	1,38	3,54	6,87	24,41	192,78

Результаты расчетов представлены в таблице 2. Численные значения плотности водных растворов свекловичной мелассы для данных объектов исследований приведены в работе [1].

### Результаты исследований реологических свойств водных растворов концентрата пивного сусла

Измерение реологических свойств водных растворов концентрированного пивного сусла выполнены на ротационном вискозиметре для растворов с концентрацией свыше 55 масс.% в диапазоне температур от 10 до 70°C. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Коэффициента динамической вязкости  $\mu$  (Па·с) водных растворов концентрата пивного сусла в зависимости от  $t$  и содержания СВ

Table 3. Dynamic viscosity coefficient  $\mu$  (Pa·s) for aqueous solutions of beer wort concentrate depending on  $t$  and dry matter content

$t, ^\circ\text{C}$	Концентрация СВ, масс. %						
	10,2	20,6	30,1	40,3	50,1	59,6	72,4
10	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$	$6,92 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-2}$	$4,74 \cdot 10^{-2}$	0,18	2,80
20	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$4,89 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$2,85 \cdot 10^{-2}$	$9,40 \cdot 10^{-2}$	1,15
30	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	$7,53 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$5,43 \cdot 10^{-2}$	0,54
40	$9,54 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$	$5,50 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$3,39 \cdot 10^{-2}$	0,29
50	$7,87 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$9,22 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	0,16
60	$6,63 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$6,80 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$5,92 \cdot 10^{-2}$
70	$5,72 \cdot 10^{-4}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$2,52 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$3,89 \cdot 10^{-2}$

В результате исследований для каждого раствора с заданной концентрацией получены графические зависимости: напряжения сдвига от градиента скорости сдвига, коэффициентов динамической вязкости от градиента скорости сдвига, а также вязкостно-температурные кривые.

В качестве примера на рисунке 8 представлены зависимости напряжения сдвига от градиента скорости сдвига водного раствора концентрата пивного сусла для исследуемого образца с концентрацией сухих веществ 59,6% в указанном диапазоне температур.

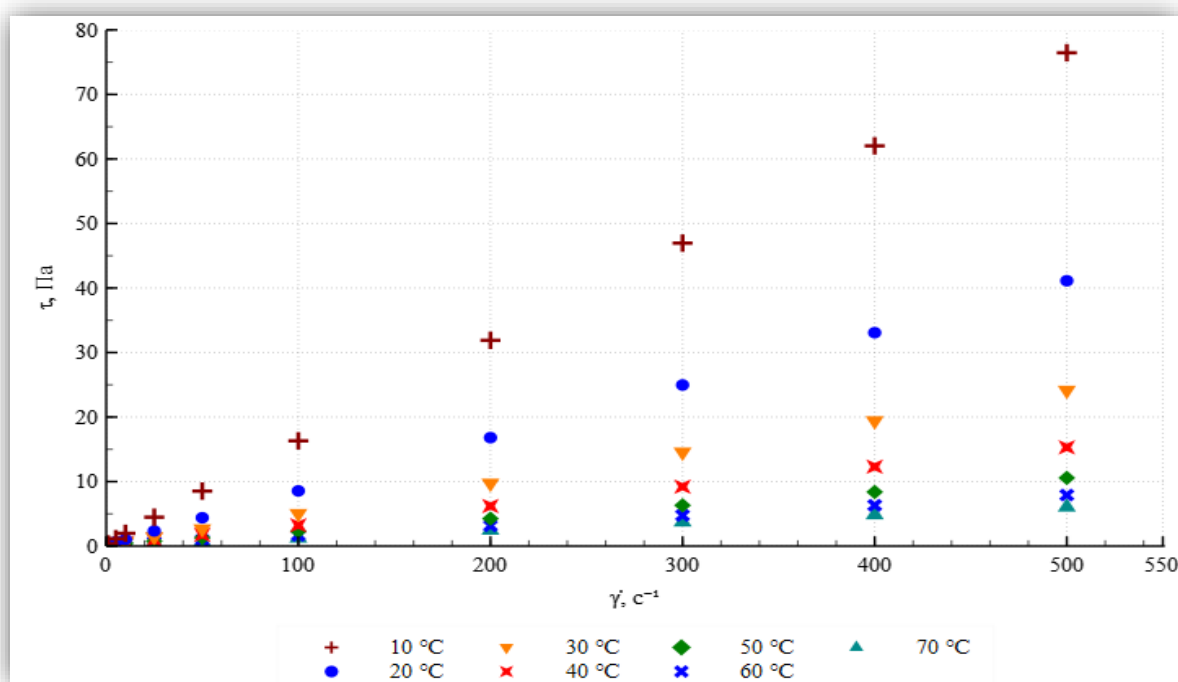


Рисунок 8 – Кривые течения водных растворов концентрата пивного сусла с концентрацией СВ 59,6 масс.% при различных температурах

Figure 8. Flow for aqueous solutions of beer wort concentrate (dry matter content is 59.6%) at various temperatures



Следует отметить, что линейный характер кривых течения с выходом графиков из нулевого значения наблюдался для всех образцов водных растворов концентрата пивного сусла для всего исследованного диапазона температур. Таким образом, можно предположить, что течение пивного сусла носит ньютоновский характер. Однако результаты измерений динамической вязкости пивного сусла показывают, что изменение вязкостно-температурных характеристик образцов носит неоднозначный характер, поскольку из рисунка 11 видно, что при увеличении градиента скорости сдвига вязкость растворов сильно уменьшается, что характеризует растворы как псевдопластичные.

На рисунках 9 и 10 представлены вязкостно-температурные кривые, построенные по результатам исследования образцов с различными концентрациями. Из графиков видно, что численное значение коэффициента динамической вязкости с ростом температуры убывает, но с ростом концентрации сухих веществ увеличивается.

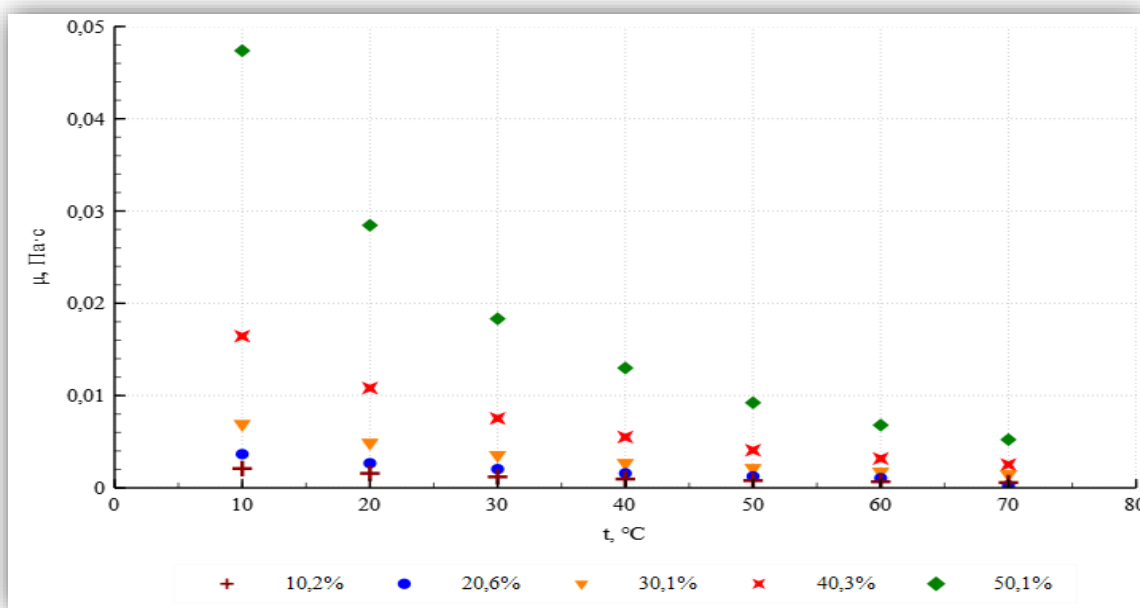


Рисунок 9 – Зависимость динамической вязкости водных растворов концентрата пивного сусла при концентрациях СВ от 10,2 до 50,1 масс.% от температуры

Figure 9. Dependence of dynamic viscosity for aqueous solutions of beer wort concentrate (dry matter content is from 10.2% to 50.1%) on temperature

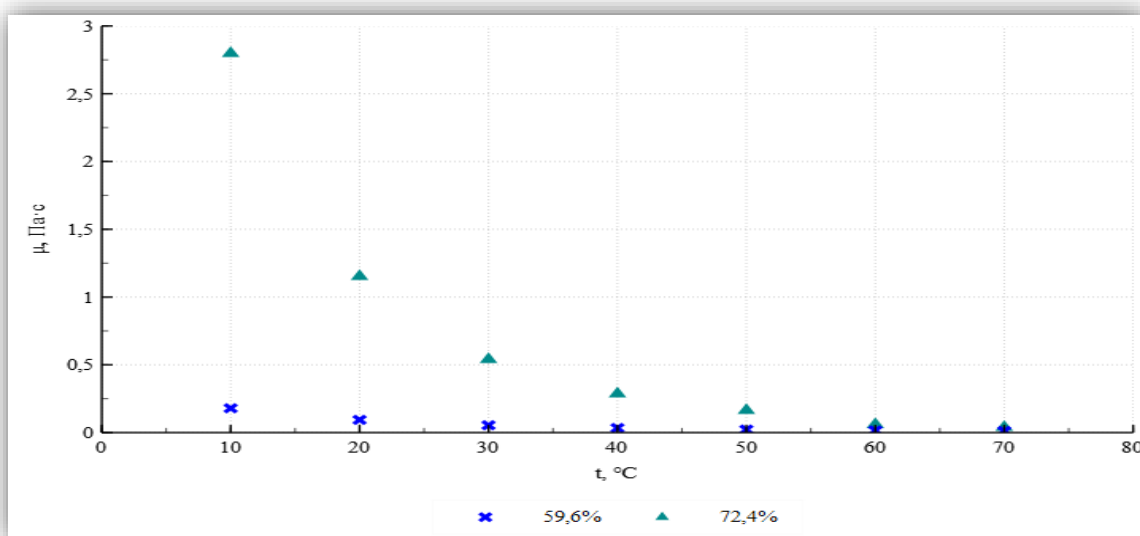


Рисунок 10 – Зависимость динамической вязкости водных растворов концентрата пивного сусла при концентрациях СВ от 59,6 до 72,4 масс.% от температуры

Figure 10. Dependence of dynamic viscosity for aqueous solutions of beer wort concentrate (dry matter content is from 59.6% to 72.4%) on temperature

На рисунке 11 представлена зависимость величины коэффициента динамической вязкости образца от градиента скорости сдвига с концентрацией сухих веществ 59,6% в указанном диапазоне температур.

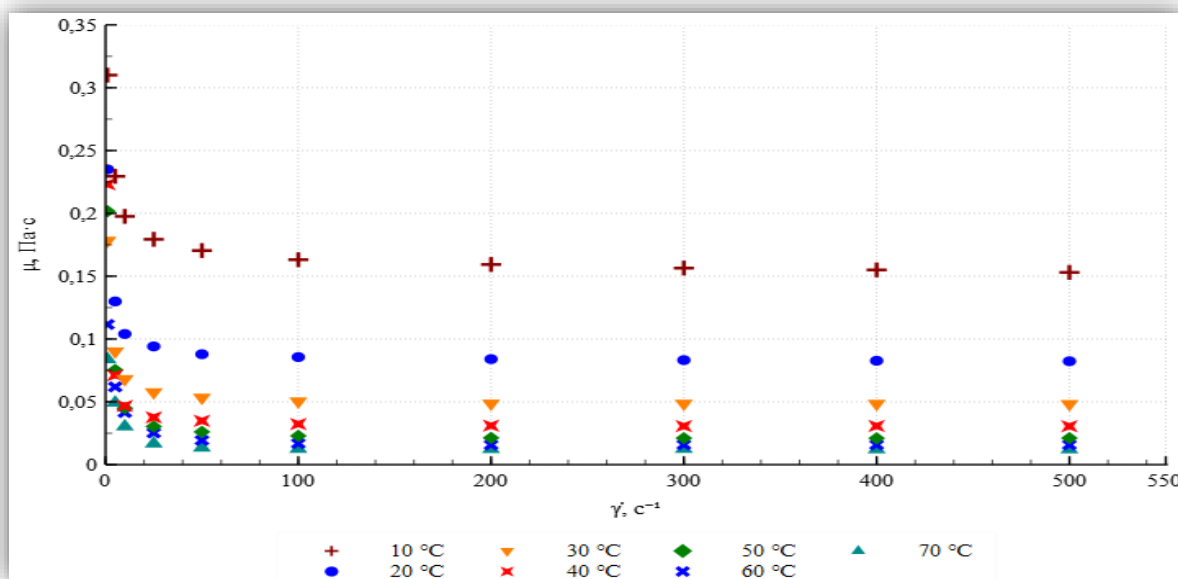


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента динамической вязкости раствора пивного сусле с концентрацией СВ 59,6 масс.% от скорости сдвига при различных температурах

Figure 11. Dependence of dynamic viscosity coefficient for aqueous solutions of beer wort concentrate (dry matter content is 59.6%) on shear rate at various temperatures

Из графика, приведенного на рисунке 11, видно, что изменение скорости сдвига оказывает слабое влияние на изменение вязкости на высоких скоростях, а наибольшее изменение наблюдается при переходе скорости сдвига от 1 до 100 с<sup>-1</sup>. Таким образом, полученные зависимости могут характеризовать исследуемые образцы как псевдопластичные жидкости (т. е. жидкости, вязкость которых зависит от скорости сдвига) только в диапазоне градиентов скоростей сдвига до 100 с<sup>-1</sup>. При более высоких значениях данного параметра растворы ведут себя как ньютоновские жидкости.

На основании измерений плотности и коэффициента динамической вязкости для всех объектов исследований были рассчитаны значения коэффициента кинематической вязкости  $\nu$ , который входит в уравнение переноса импульса [1, уравнение 1]. Численные значения плотности водных растворов концентрата пивного сусле для данных объектов исследований приведены в работе [1]. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Коэффициент кинематической вязкости  $\nu \cdot 10^6$  (м<sup>2</sup>/с) водных растворов концентрата пивного сусле в зависимости от  $t$  и содержания СВ

Table 4. Cinematic viscosity coefficient  $\nu \cdot 10^6$  (m<sup>2</sup>/s) for aqueous solutions of beer wort concentrate depending on  $t$  and dry matter content

$t, ^\circ\text{C}$	Концентрация СВ, масс. %						
	10,2	20,6	30,1	40,3	50,1	59,6	72,4
10	2,01	3,37	6,13	13,98	38,53	140,38	2094,84
20	1,51	2,47	4,35	9,23	23,23	73,79	866,88
30	1,15	1,89	3,17	6,45	15,02	42,77	407,58
40	0,93	1,47	2,41	4,73	10,69	26,82	217,01
50	0,77	1,17	1,93	3,52	7,63	17,77	124,98
60	0,65	0,99	1,58	2,76	5,65	12,45	45,33
70	0,56	0,251	1,34	2,2	4,37	9,54	29,95

## Заключение

Полученные результаты позволят более объективно подойти к проверке теоретических предсказаний вязкостных свойств жидкого вещества и моделированию тепло-массообменных процессов, что даст возможность специалистам в области пищевых и биотехнологических производств применять научно-обоснованный подход в гидравлических и теплообменных расчетах при проектировании современных аппаратов. Результаты исследования могут быть использованы при лабораторной проверке количественных и качественных характеристик поставляемого на производство сырья, а также имеют практическую ценность при выборе технологических режимов культивирования микроорганизмов для хлебопекарных и пивоваренных производств.

Особенности реологического поведения обоих объектов исследования заключаются в том, что при скоростях сдвига менее  $100 \text{ с}^{-1}$  растворы проявляют псевдопластичные свойства, а при скоростях сдвига более  $100 \text{ с}^{-1}$  ведут себя как ньютоновские жидкости.

Физические свойства этих двух различных по способу получения и составу жидкостей (свекловичная меласса и пивное сусло) имеют не только аналогичный характер изменения исследуемых параметров, но и сопоставимый численный диапазон их значений.

Получение математических зависимостей для оценки коэффициентов вязкости с достаточной точностью для инженерных расчетов технологического оборудования и коммуникаций станет целью дальнейших исследований.

## Литература

1. Суздальцева О.А., Фомина Е.А., Новоселов А.Г., Сорокин С.А., Баранов И.В., Кравцова Е.В., Гуляева Ю.Н. Процессы молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы в жидкостных питательных средах дрожжевой и пивной отраслях промышленности. Часть 1. Исследование плотности водных растворов мелассы и концентрированного пивного сусла // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2022. № 2. С. 28–39. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39
2. Нарцисс Л. Краткий курс пивоварения. СПб.: Профессия, 2007. 640 с.
3. Новаковская С.С., Шишацкий Ю.И. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей. М.: Пищевая промышленность, 1980. 375 с.
4. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива. СПб., Профессия, 2001. 912 с.
5. Валентас К., Ротштейн Э., Сингх Р. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов. СПб.: Профессия, 2004. 848 с.
6. Travnicek P., Los J., Junga P. Comparison of rheological properties of hopped wort and malt wort. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2015, V. 63, no. 1, pp. 131–136. DOI: 10.11118/actaun201563010131
7. Severa L., Los J. Vliv teploty na dynamickou viskozitu černého piva. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2008, V. 56, no. 2, pp. 303–308. DOI: 10.11118/actaun200856020303
8. Severa L., Los J., Nedomova Š., Buchar J. On the rheological profile of malt wort during processing of substrate for lager beer. *Journal of Food Physics.* 2009, V. 22, pp. 5–16.
9. Bozikova M., Hlavach P. Comparison of thermophysical and rheological properties of different light beers. *Journal on Processing and Energy in Agriculture.* 2011, V. 15, no. 1, pp. 6–11.
10. Hlavach P., Bozikova M. Comparison of Topvar beer rheological and thermophysical properties. *The Scientific Journal for Agricultural Engineering.* 2013, V. 15, Is. 1, pp. 23–27.

## References

1. Suzdaltseva O.A., Fomina E.A., Novoselov A.G., Sorokin S.A., Baranov I.V., Kravtsova E.V., Gulyaeva Yu.N. Processes of Molecular Transfer of Momentum, Thermal Energy and Mass in Liquid Nutrient Media of Yeast and Beer Industries. Part 1. Investigation of the density of aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort. *Processes and Food Production Equipment.* 2022, no. 2, pp. 28–39. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39 (In Russian)
2. Narcissus L. A short course in brewing. St. Petersburg, Professija Publ., 2007. 640 p. (In Russian)
3. Novakovskaya S.S., Shishatsky Yu.I. *Handbook for the production of baker's yeast.* Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 375 p. (In Russian)
4. Kuntze V., Mit G. *Technology of malt and beer.* St. Petersburg, Professija Publ., 2001. 912 p. (In Russian)
5. Valentas K., Rothstein E., Singh R. *Food engineering: a reference book with examples of calculations.* St. Petersburg, Professija Publ., 2004. 848 p. (In Russian)

6. Travnicek P., Los J., Junga P. Comparison of rheological properties of hopped wort and malt wort. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2015, V. 63, no. 1, pp. 131–136. DOI: 10.11118/actaun201563010131
7. Severa L., Los J. Vliv teploty na dynamickou viskozitu černého piva. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2008, V. 56, no. 2, pp. 303–308. DOI: 10.11118/actaun200856020303
8. Severa L., Los J., Nedomova Š., Buchar J. On the rheological profile of malt wort during processing of substrate for lager beer. *Journal of Food Physics.* 2009, V. 22, pp. 5–16.
9. Bozikova M., Hlavach P. Comparison of thermophysical and rheological properties of different light beers. *Journal on Processing and Energy in Agriculture.* 2011, V. 15, no. 1, pp. 6–11.
10. Hlavach P., Bozikova M. Comparison of Topvar beer rheological and thermophysical properties. *The Scientific Journal for Agricultural Engineering.* 2013, V. 15, Is. 1, pp. 23–27.

### *Информация об авторах*

Александр Геннадьевич Новоселов – д-р техн. наук, профессор, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Юрий Леонидович Малахов – аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Анастасия Викторовна Чеботарь – канд. техн. наук, ведущий инженер

Сергей Андреевич Сорокин – канд. техн. наук, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Игорь Владимирович Баранов – д-р техн. наук, профессор, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Юлия Николаевна Гуляева – канд. техн. наук, научный сотрудник

### *Information about the authors*

Alexander G. Novoselov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Professor of the Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"

Yuri L. Malahov, Postgraduate Student of the Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"

Anastasiia V. Chebotar, Ph.D., Principal Engineer

Sergey A. Sorokin, Ph.D., Associate Professor of the Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"

Igor V. Baranov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Professor of the Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"

Yuliya N. Gulyaeva, Ph.D., Researcher

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

*Статья поступила в редакцию 09.02.2023*

*Одобрена после рецензирования 16.03.2023*

*Принята к публикации 20.03.2023*

*The article was submitted 09.02.2023*

*Approved after reviewing 16.03.2023*

*Accepted for publication 20.03.2023*