

Научная статья

УДК 66.098.4

DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-28-39

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**О.А. Суздальцева¹, Е.А. Фомина¹, А.Г. Новоселов¹, С.А. Сорокин¹, И.В. Баранов¹, Е.В. Кравцова^{1*}, Ю.Н. Гуляева²¹Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, **evkravtcova@itmo.ru*²НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) Военной академии МТО, Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. Исследовали процессы переноса импульса, тепловой энергии и массы в питательных средах дрожжевых и пивоваренных производств с целью установления взаимосвязи между коэффициентами переноса в соответствующих физических процессах: коэффициентами кинематической вязкости, температуропроводности и молекулярной диффузии. Обоснована необходимость комплексных экспериментальных исследований одной из важнейших динамических характеристик материи – плотности распределения массы вещества в его объеме. Объектами изучения стали свекловичная меласса и концентрированный солодовый экстракт пивного сусла, исходная концентрация сухих веществ (СВ) в которых составила 77,7 и 81 масс.% соответственно. В дальнейшем приготовили шесть растворов свекловичной мелассы с концентрацией растворимых СВ 16,2; 32,5; 40,2; 51,9; 60,2; 69,9% и семь растворов экстракта пивного сусла с концентрацией СВ 10,2; 20,6; 30,1; 40,3; 50,1; 59,6 и 72,4 масс.%. Диапазон варьирования температуры составлял 293–363К для водных растворов мелассы и 283–353К для водных растворов концентрата пивного сусла. Измерения плотности всех объектов проводились с помощью плотномера, концентрации растворимых сухих веществ в водных растворах – с помощью рефрактометра, в результате чего получены графические и математические зависимости плотности от концентрации СВ и температуры. Сравнение численных значений плотности водных растворов мелассы и концентрата пивного сусла, при сопоставимых величинах содержания сухих веществ в них и температурах, показало полное совпадение 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. Единственным исходным параметром, отличающим один объект исследования от другого, являлась массовая концентрация растворенных сухих веществ, поскольку этот параметр в большей степени отражает технологические, а не физические свойства, то возникла необходимость в точном определении значений плотности в широком диапазоне концентраций СВ и температур, которые востребованы и для гидравлических и тепловых расчетов.

Ключевые слова: аэробные процессы; плотность питательных сред; водный раствор мелассы; концентрат пивного сусла, концентрация сухих веществ

Original article

**Molecular transfer processes in liquid nutrient media in the yeast and beer industries.
1. Study of the density of aqueous solutions of molasses and concentrated beer wort**Olga A. Suzdaltseva¹, Ekaterina A. Fomina¹, Alexander G. Novoselov¹, Sergey A. Sorokin¹, Igor V. Baranov¹,
Evgeniya V. Kravtcova^{1*}, Yuliya N. Gulyaeva²¹ITMO University, St. Petersburg, Russia, **evkravtcova@itmo.ru*²Research Institute Military Logistics Academy, St. Petersburg, Russia

Annotation. The article is a research work in the field of processes and apparatuses of biotechnological productions, aimed at a comprehensive study of the processes of transfer of momentum, thermal energy and mass in nutrient media of yeast and brewing industries. The ultimatum of research is to establish the relationship between the transfer coefficients in the relevant physical processes, namely, the coefficients of kinematic viscosity, thermal diffusivity, and molecular diffusion. The rationale for the need to conduct complex experimental studies of one of the most important dynamic characteristics of matter – the density distribution of the matter mass in its volume – is presented. The objects of research were aqueous solutions of beet molasses and beer wort concentrate, mass concentration of soluble solids (DM) being 77.7 and 81% DM respectively. Six aqueous solutions of beet molasses were made with the concentration of DM of 16.2, 32.5, 40.2, 51.9, 60.2, and 69.9% DM. For seven aqueous solutions of beer wort concentrate used in the experiment the concentration of DM was 10.2, 20.6, 30.1, 40.3, 50.1, 59.6, and 72.4% DM. The range of temperature variation was 293K–363K for aqueous solutions of molasses and 283K–353K for aqueous solutions of beer wort concentrate. Measurements of the density of all research

objects were carried out using an Excellence D4 Mettler Toledo density meter, the concentration of soluble solids in aqueous solutions was measured using a PTR46 refractometer manufactured by Index Instruments Ltd. As a result of the studies carried out, graphical and mathematical dependences of the density of all studied objects on the SW concentration and temperature were obtained. Comparison of the numerical values for the density of molasses aqueous solutions and beer wort concentrate, with comparable values of the content of solids in them and temperatures, showed a complete match. This made it possible to identify aqueous solutions of molasses and beer wort concentrate, despite the fact that both of these products are produced from different feed stocks: molasses is a waste product of sugar production, and beer wort is a semi-finished product in the process of obtaining beer products from grain raw materials. The only original parameter differentiating one type of analysis from another is mass concentration of soluble solids. As the parameter corresponds to technological properties more than physical ones, we had to determine the values of density over a wide range of solids' concentrations and temperatures, which are widely used both for hydraulic and for thermal calculations.

Keywords: aerobic processes; density of nutrient media; an aqueous solution of molasses; beer wort concentrate, solids concentration

Введение

Использование микроорганизмов в биотехнологических производствах пищевых продуктов в промышленных масштабах получило широкое распространение [1, 2]. В частности, невозможно получение качественных хлебопродуктов или слабоалкогольных напитков, например пива, без включения в рецептуру исходных ингредиентов непосредственно клеток дрожжей. И в том и другом случае при промышленном производстве указанных выше целевых продуктов требуется постоянное воспроизводство биомассы. На российском рынке наиболее широкое применение получили дрожжи рода *Saccharomyces cerevisiae*.

Промышленное производство биомассы осуществляется в специальных аппаратах – ферментаторах, которые реализуют процесс аэробного глубинного культивирования микроорганизмов в жидкой питательной среде воздушно-приточным способом [3].

К настоящему времени разработано большое число различных конструкций ферментаторов, классификация которых представлена в работах [1–4]. Общепринятой является классификация по способу подведения энергии в ферментатор [2, 3], а наиболее распространенной конструкцией, применяемой для аэробного культивирования дрожжевых клеток в промышленных объемах, – ферментатор барботажного типа.

Подводимая энергия к культуральной жидкости, находящейся в рабочем объеме ферментатора, необходима для создания требуемой гидродинамической обстановки, заключающейся, главным образом, в равномерном распределении клеток, питательных и ростовых веществ, а также растворенного кислорода по всему объему. Проблема обеспечения питательными и ростовыми веществами в начальный период времени культивирования решена (состав питательной среды заранее подготовлен технологами согласно технологическому режиму проведения процесса и распределен равномерно). Однако в процессе культивирования необходимо поддерживать равномерность распределения концентраций питательных веществ по всему рабочему объему. Достигается это за счет турбулизации жидкостной фазы с равной интенсивностью в каждой точке рабочего объема, что на практике является решаемой задачей.

Другое дело с равномерным распределением концентрации растворенного кислорода. При выходе воздушных пузырьков из отверстий трубчатого газораспределителя (барботажных ферментаторов), расположенного в нижней части аппарата, процесс их движения в аппарате снизу вверх практически неуправляем. Обычно создание газожидкостной смеси с пузырьковой структурой в барботажных аппаратах достигается увеличением подачи воздуха в аппарат. Это приводит к увеличению интенсивности турбулизации (перемешивания) жидкостной фазы, препятствию коалесценции газовых пузырьков, снижению расстояния между соседними пузырьками и, как следствие, более равномерному распределению концентраций растворенного кислорода.

Однако увеличение подачи воздуха в аппарат ограничено следующими негативными факторами.

1. При увеличении подачи воздуха в аппаратах с неорганизованным движением жидкостной фазы происходит смена режимов с пузырькового на снарядный. В этом случае часть газовых пузырьков объединяется, образует крупные пузыри и устремляется с большей скоростью через толщу культуральной

жидкости, содержащей клетки. При этом существенно уменьшается величина удельной поверхности контакта фаз и время пребывания газовой фазы в культуральной жидкости. К тому же это невыгодно и с экономической стороны, т. к. часть затраченной энергии на подачу воздуха в аппарат используется неэффективно, фактически вхолостую.

2. Учитывая, что культуральные жидкости относятся к слабокоалесцирующим средам, то увеличение подачи воздуха приводит к увеличению пенообразования на свободной поверхности рабочего объема и требует своевременного гашения образующейся пены. При промышленном культивировании гашение пены осуществляется способом химического пеногашения, т. е. подачей в рабочий объем определенного количества веществ (олеиновой кислоты или других), разрушающих структуру пены. Но, с другой стороны, химический пеногаситель неизбежно распределяется по всему рабочему объему и в результате производит негативный эффект, временно способствуя коалесценции газовых пузырей, снижая удельную поверхность контакта фаз со всеми вытекающими последствиями.

3. Процесс аэробного культивирования дрожжевых клеток сопровождается большим выделением тепловой энергии, образующейся в результате сложнейших экзотермических реакций внутри клетки. Это тепло от них необходимо отводить в окружающую клетки питательную среду. В свою очередь, тепло от питательной среды отводится через различные теплообменные устройства (тепловые рубашки или выносные теплообменники различного типа). Температура, при которой проводится процесс оптимального культивирования клеток, лежит в довольно узком диапазоне, 23–30°C для пивных дрожжей [5, 6] и в пределах 28–32°C для хлебопекарных [7].

Таким образом, при аэробном культивировании микроорганизмов с целью наращивания биомассы необходимо обеспечить снабжение каждой клетки достаточным для ее максимальной скорости роста питанием и дыханием, а также создать оптимальные условия для их жизнедеятельности, в первую очередь, температурные. При этом необходимо учитывать, что концентрация биомассы в процессе культивирования будет постоянно расти, и следовательно массовые потоки питательных веществ и растворенного кислорода из окружающей среды тоже должны возрастать.

В процессе метаболизма, вследствие увеличивающегося числа клеток, неизбежно будет повышаться и количество отводимого, выделяемого клетками в жидкостную среду, растворенного диоксида углерода, который в дальнейшем, диффундируя через нее в воздушные пузырьки, удаляется из ферментатора. Массовые потоки кислорода, потребляемого и выделяемого клетками диоксида углерода, примерно равны в рассматриваемый час культивирования [2, 3].

Как видно из изложенного, механизм переноса тепловой энергии и массы во многом зависит от гидродинамической обстановки в рабочем объеме. Основное сопротивление скоростям переноса массы газовой фазы и тепловой энергии на молекулярном уровне лежит в жидкостной фазе [2, 3].

В общем случае на поверхностях, разделяющих фазы, будь то твердая или газовая практически всегда существуют пограничные слои, в которых наблюдается отсутствие турбулентности. Толщина этих слоев может быть соизмерима с размерами молекул в зависимости от степени турбулизации той или иной фазы. Например, в пристенной области внутренней поверхности корпуса барботажного аппарата или теплопередающей поверхности при встроенных элементах трубчатых или змеевиковых теплообменников в рабочий объем ферментатора. Даже на поверхности пузырьков газовой фазы существует слой жидкостной фазы, обусловленный наличием поверхностного натяжения жидкости, окружающей объем, заключенного в пузырьке газа. Это явление подтверждается многочисленными эмпирическими уравнениями, в которых, как правило, вводятся параметры, учитывающие толщину ламинарного пограничного подслоя, теплового подслоя или диффузионного подслоя [3]. Наличие этих слоев предполагает, что перенос количества движения (импульса), тепловой энергии и массы целевых компонентов в объеме рабочей среды происходит по механизмам молекулярного переноса, т. е. вязкого трения, температуропроводности и молекулярной диффузии.

Количественно значения этих трех механизмов определяются коэффициентом кинематической вязкости ν , коэффициентом температуропроводности a и коэффициентом молекулярной диффузии D_{AB} , соответственно, которые входят в классические уравнения переноса:

импульса

$$\tau = -\nu \frac{\partial(\bar{U}_x \cdot \rho)}{\partial y};$$

тепловой энергии

$$q = -a \frac{\partial(C_p \cdot \rho \cdot T)}{\partial y};$$

и массы

$$m_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y}.$$

Эти коэффициенты переноса имеют одну и ту же размерность – м²/с.

Процесс молекулярного переноса количества движения в условиях ламинарного режима может быть представлен в виде уравнения

$$\tau = -\nu \frac{\partial(\bar{U}_x \cdot \rho)}{\partial y}, \quad (1)$$

где τ – касательные напряжения или напряжение сдвига, Н/м²;

\bar{U}_x – осредненная по времени локальная скорость жидкости в направлении x , м/с;

y – значения координат соседних слоев, взятых по направлению, перпендикулярному к направлению движения слоев x , м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

Уравнение (1) описывает перенос импульса в направлении y , перпендикулярном к направлению движения основного потока жидкости x , т. е. импульс распространяется от слоев, имеющих большую скорость, к слоям, имеющим меньшую скорость, по аналогии распространения тепловой энергии, передающейся от более теплых областей к более холодным. Движущей силой в процессе переноса импульса является градиент скорости. В этом контексте закон Ньютона рассматривается как уравнение, определяющее силу, что подчеркивает именно механическую природу этого явления. В процессе вязкого течения (ламинарный режим течения) молекулы переходят из одного временного положения равновесия в другое под действием тангенциальной силы.

Уравнение (1) может быть представлено в более традиционном виде, если выразить коэффициент кинематической вязкости через динамическую вязкость, используя известное соотношение

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

Тогда получим следующее выражение

$$\tau = -\mu \frac{dU_x}{dy} = \mu \dot{\gamma}, \quad (2)$$

где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига, с⁻¹.

Уравнение (2) в явном виде показывает зависимость напряжений, возникающих в жидкостном потоке, от скорости движения жидкостных частиц. Входящий в это уравнение коэффициент пропорциональности μ , названный коэффициентом динамической вязкости, во многом определяется молекулярным составом самой жидкости и внешними условиями, при которых происходит ее перемещение.

В гидравлических расчетах использование понятия градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$, вытекающего из реологических рассматриваний, нецелесообразно. Обычно при инженерных расчетах трубопроводов, технологических аппаратов и теплообменников проточного типа используют понятие средней скорости потока V . Связь между этими двумя величинами можно найти, если рассмотреть равномерное движение жидкости в трубах.

Для этого рассмотрим основное уравнение равномерного движения жидкости ньютоновского типа, записанное в виде

$$\tau = \rho g i R, \quad (3)$$

где i – гидравлический уклон, $i = \frac{h_{\text{дл}}}{l}$;

$h_{\text{дл}}$ – удельные гидравлические потери энергии по длине трубопровода, м;

l – длина рассматриваемого участка, м;

R – гидравлический радиус, $R = \frac{d}{4}$;

d – диаметр трубопровода, м.

Подставив значения $h_{\text{дл}}$ и R в уравнение (3), получим

$$\tau = \frac{\rho g h_{\text{дл}} d}{4l}. \quad (4)$$

Гидравлические потери энергии по длине в общем случае определяются по уравнению Дарси–Вейсбаха [3]

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l V^2}{d 2g},$$

где λ – коэффициент трения по длине (коэффициент Дарси).

В случае ламинарного режима движения ньютоновской жидкости в канале круглого поперечного сечения

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}},$$

где Re – критерий Рейнольдса,

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu}.$$

Подставляя в уравнение (4) раскрытые выше значения входящих в него величин, получим

$$\tau = \frac{8 \cdot V \cdot \mu}{d}. \quad (5)$$

Приравнявая правые части уравнений (2) и (5) друг к другу, и выражая градиент скорости сдвига через среднюю скорость потока V , получаем следующую зависимость

$$\dot{\gamma} = \frac{8 \cdot V}{d}. \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет связывать данные по вязкости, полученные на ротационных вискозиметрах со скоростями, реально возникающими в каналах. Следует отметить, что уравнение (6) применимо только к жидкостям, проявляющим ньютоновские свойства при их течении в трубопроводах, т. е. когда вязкость не зависит от скорости движения и времени силового воздействия.

Как правило, питательные среды микробиологических производств имеют сложный химический состав [2, 5]. Главная цель, которая преследуется при составлении питательной среды, заключается в бесперебойном и сбалансированном обеспечении клеток химическими элементами, необходимыми для их успешной жизнедеятельности и максимального роста. В основе питательных сред для дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae* лежит вода, обогащенная моносахаридами и олигосахаридами (глюкозой, сахарозой и т. п.). Источники получения этих веществ могут быть различными, но исторически сложилось, что основным для дрожжевой промышленности является отход сахарного производства – свекловичная меласса, а основным для пивоваренной промышленности – синтез этих сахаров из пророщенного ячменного зерна (солода), при этом исходные способы их получения кардинально отличаются друг от друга. Меласса является отходом сахарного производства, а пивное сусло – полуфабрикатом в технологическом процессе пивного производства. И в том, и другом случае их получения они в идеале должны содержать моносахариды и/или олигосахариды, размеры молекул которых способны диффундировать через клеточную мембрану.

Таким образом, питательная среда представляет собой многокомпонентный водный раствор, обладающий определенными физическими и теплофизическими свойствами, зависящими, в первую очередь, от количественного и качественного состава. Очевидно, что эти свойства будут отличаться от физических и теплофизических свойств воды.

Наиболее полно исследования физических свойств водных растворов свекловичной мелассы были представлены в работе [7]. Исследования плотности проводились при варьировании СВ в диапазоне от 5,5 до 82,0 масс.% и температур от 20 до 120°C.

Математическая обработка результатов исследований плотности водных растворов мелассы позволила получить следующее уравнение

$$\rho = 1007,3 + 4,11(SB - 0,11t). \quad (7)$$

По рекомендациям авторов работы [7], применение уравнения (7) справедливо для диапазона СВ 5,5–50,4% в интервале температур 20–100°C. Недостатком этой работы является то, что в ней не приведены методы определения концентрации сухих веществ и, собственно, плотности, что требует уточнения этих параметров для нижеизложенных целей.

Комплексные исследования, направленные на измерения этих коэффициентов у одного и того же объекта изучения, отсутствуют. Да, имеются данные по их измерению, но эти измерения были выполнены свыше 40 лет назад [7], но объекты исследования не гарантировали постоянство их количественного и качественного состава, т. к. выполнялись различными исследователями, в разное время, на различных экспериментальных установках. К тому же, за прошедшее время существенно изменилась технология и машинно-аппаратурное обеспечение получения сахара из сахарной свеклы, а следовательно, и свекловичной мелассы. Еще больше это касается получения целевых компонентов из ячменного солода при производстве пивного сула [8]. Опубликован ряд исследований [9–11], касающихся оценки физических свойств пивного сула и производимого на его основе пива. Более того, за это время значительно продвинулись научно-исследовательские способы, методы и их приборное обеспечение, связанное с цифровой обработкой измерительных сигналов, а также полученных результатов измерений [12–15].

Цель данных исследований – получение объективных данных по плотности объектов изучения в широком диапазоне концентраций сухих веществ и температур, которые могут быть использованы при выборе численных значений удельной теплоемкости и кинематической вязкости.

Объекты и методы исследования

Свекловичная меласса. Единственным исходным параметром, отличающим один объект изучения от другого, являлась массовая концентрация растворенных сухих веществ, определяемых с помощью рефрактометра. Учитывая тот факт, что это параметр в большей степени отражает технологические, а не физические свойства, то возникла необходимость в точном определении значений плотности в широком диапазоне концентраций СВ и температур, которые востребованы и для будущих гидравлических и тепловых расчетов.

В рассматриваемом случае мы имеем дело с водными растворами растворимых сухих веществ, содержащихся в свекловичной мелассе. Состав свекловичной мелассы, поступающей на дрожжевые заводы, приведен в таблице 1, из которой видно, что доброкачественный состав свекловичной мелассы определяется содержанием сухих веществ, и если качественный ее состав соответствует ГОСТу, то будем считать, что величина СВ является единственным параметром, характеризующим исследуемый раствор и определяющим теплофизические свойства исследуемых водных растворов мелассы.

Объектом данного исследования являлась свекловичная меласса, полученная от АО «Комбинат пищевых продуктов» (Россия, Санкт-Петербург). Исходная концентрация сухих веществ измерена на рефрактометре марки PTR46 (Index Instruments Ltd., Великобритания) и составила 77,7%.

Для дальнейших исследований путем разбавления дистиллированной водой исходного образца было приготовлено шесть растворов с массовым содержанием сухих веществ: 16,2; 32,5; 40,2; 51,9; 60,2; 69,9%, включая концентрацию исходного объекта 77,7%.

Таблица 1. Химический состав свекловичной мелассы
Table 1. Chemical composition of beet molasses

Показатели	Содержание (минимальное)	Содержание (максимальное)	Оптимальное для дрожжей
содержание сухих веществ (СВ)	61	84	74
содержание сахара по поляриметру	40	54	46–50
содержание инвертного сахара	0,1	10	не более 2
содержание раффинозы	–	3,0	не более 1
		%	
сумма сбраживаемых сахаров	40	57	46–50
доброкачественность	56	75	не менее 55
зола (без кальция)	4,0	12	не менее 7,0
K ₂ O	1,0	5,5	3,5
MgO	0,001	1,0	–
CaO	0,1	3,0	не более 1,0
Na ₂ O ₄	1,0	1,4	–

Концентрированное пивное сусло. Был выбран концентрированный солодовый экстракт Muntons "Bitter" с содержанием сухих веществ 81 масс.%. Такой выбор позволил получить путем его разбавления дистиллированной водой варианты сусла с различной плотностью и исследовать их физические свойства в широком диапазоне концентраций от 10,2 до 81 масс.% СВ.

Были приготовлены семь растворов с концентрациями: 10,2; 20,6; 30,1; 40,3; 50,1; 59,6 и 72,4 масс.%. Оценка содержания сухих веществ в растворах выполнялась на рефрактометре марки PTR46.

Исследования влияния температуры на физические свойства вышеперечисленных объектов исследований проводилось в диапазоне 10 ÷ 80°C с дискретностью 10°C.

Плотность растворов определялась с помощью электронного плотномера марки Excellence D4 (Mettler Toledo, Швейцария).

Результаты и обсуждение

1. Результаты измерений физических свойств водных растворов свекловичной мелассы

Результаты измерений плотности, представленные в таблице 2, позволили получить графические зависимости плотности раствора (рисунок 1 и 2) свекловичной мелассы от содержания сухих веществ при различных температурах.

Таблица 2. Значения плотности растворов свекловичной мелассы от температуры при различном содержании сухих веществ

Table 2. Density values of beet molasses solutions versus temperature at different solids' content

Температура, К	Концентрация СВ, %						
	16,2	32,5	40,2	51,9	60,2	69,9	77,7
	Плотность, кг/м ³						
293	1064	1138	1181	1240	1283	1347	1393
303	1063	1135	1178	1236	1279	1341	1389
313	1061	1132	1174	1232	1273	1335	1387
323	1056	1128	1170	1227	1268	1331	1381
333	1052	1124	1166	1223	1263	1322	1378
343	1049	1122	1162	1219	1258	1318	1374
353	1044	1116	1155	1215	1253	1312	1370
363	1042	1113	1152	1210	1248	1306	1367

На рисунке 1 представлена графическая зависимость ρ от содержания сухих веществ в водных растворах мелассы при 20°C, и выполнено сравнение полученных данных по плотности с данными Комбината пищевых продуктов. Следует отметить, что линейная зависимость ρ от сухих веществ наблюдалась при всех исследованных температурах.

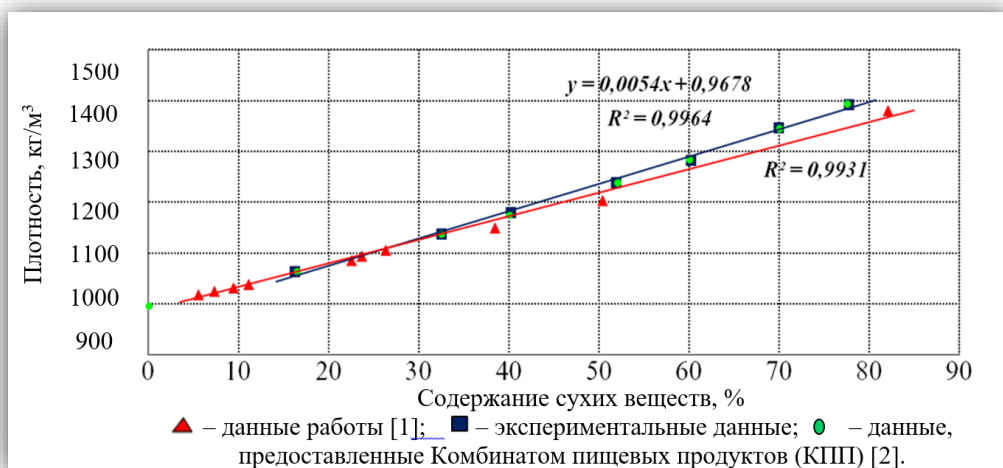


Рисунок 1 – Зависимость плотности водных растворов свекловичной мелассы от содержания сухих веществ при 20°C
 Figure 1. Dependency for the density of beet molasses aqueous solutions on the content of solids at 20°C

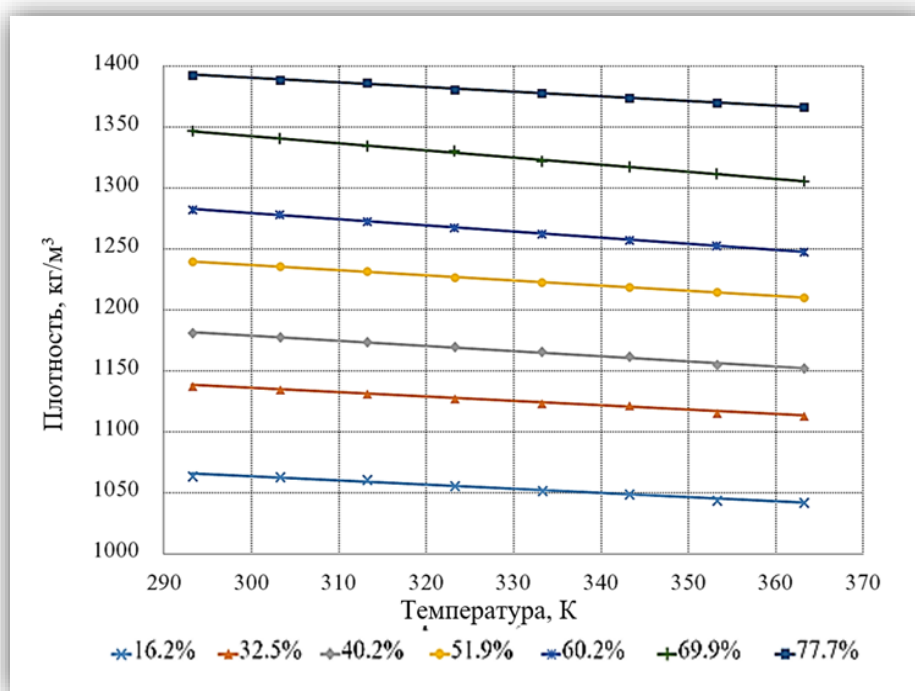


Рисунок 2 – Зависимость плотности растворов свекловичной мелассы от температуры при различном содержании сухих веществ
 Figure 2. Dependency of the density of solutions of beet molasses on temperature at different contents of solids

Математическая обработка графических зависимостей позволила получить следующее уравнение

$$\rho = 1100 - (0,431 \cdot T) + (5,257 \cdot n), \quad (8)$$

где T – температура, К;

n – содержание сухих веществ, масс. %.

Максимальное относительное отклонение расчетных значений плотности по данному уравнению и экспериментальных данных составляет около 1%.

2. Результаты измерений физических свойств водных растворов концентрата пивного сусла

Результаты измерений плотности пивного сусла представлены в таблице 3 и на рисунке 3 в виде зависимостей плотности растворов (ρ , кг/м³) от процентного содержания в них сухих веществ (СВ%) и температуры (T , К).

Таблица 3. Результаты измерений плотности пивного сусла
 Table 3. The results of measurements of the density of objects of research of beer wort

Температура, К	СВ, масс. %								
	0	10,2	20,6	30,1	40,3	50,1	59,6	72,4	81
	Плотность, кг/м ³								
283	1000	1039	1083	1128	1176	1230	1279	1336	1414
293	998	1037	1080	1125	1172	1225	1273	1329	1407
303	995	1034	1076	1121	1167	1220	1269	1325	1402
313	992	1030	1072	1116	1162	1215	1263	1319	1396
323	988	1026	1067	1111	1157	1209	1257	1312	1390
333	983	1021	1062	1106	1151	1203	1251	1306	1384
343	977	1015	1056	1100	1145	1197	1245	1298	1377
353	971	1009	1050	1094	1139	1190	1238	1286	1372

На рисунке 3 представлена графическая зависимость ρ от содержания сухих веществ в водных растворах пивного сусла при различных температурах в диапазоне от 283 до 353 К.

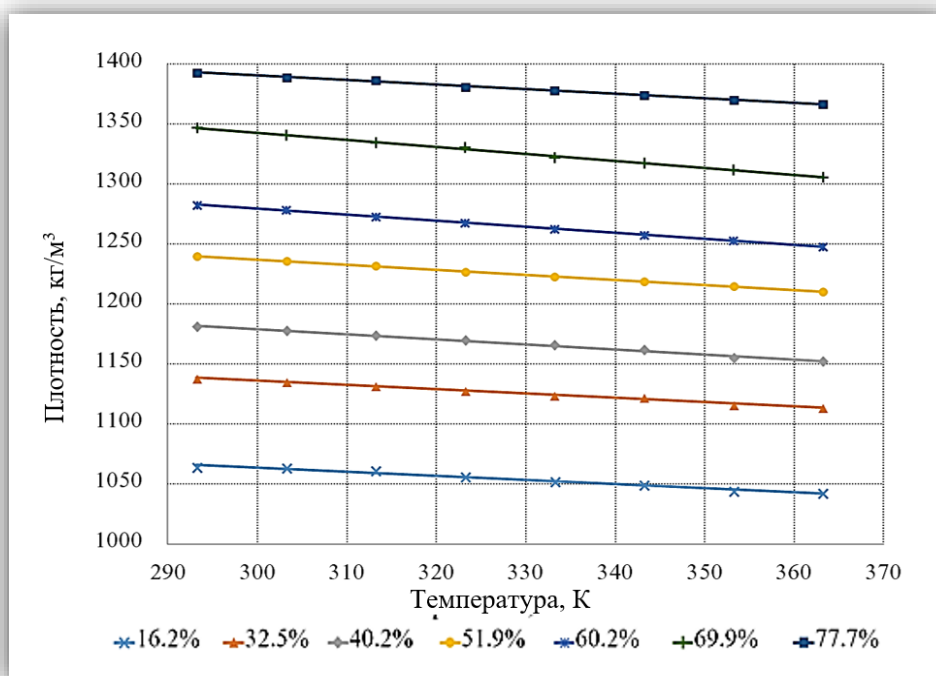


Рисунок 3 – Зависимость плотности растворов отфильтрованного пивного сусла от содержания сухих веществ в диапазоне температур от 283 до 253 К

Figure 3. Dependence of the density of solutions of filtered beer wort on the content of solids in the temperature range from 283 to 253K

Математическая обработка графических зависимостей, представленных на рисунке 3, позволила получить эмпирическое уравнение, дающее возможность оценивать плотность пивного сусла в указанном диапазоне варьируемых параметров с точностью $\pm 1\%$

$$\rho = 997 + (4,717 \cdot n) - (0,533 \cdot T), \tag{9}$$

где T – температура, К;

n – содержание сухих веществ, масс. %.

Таким образом, полученные данные позволили связать технологический параметр, характеризующий содержание СВ в водном растворе концентрата пивного сусла, с физическим, т. е. плотностью ρ , и в дальнейшем рассчитывать значения кинематической вязкости всех объектов исследования по уравнению 2.

Графическая температурная зависимость полученных результатов представлена на рисунке 4.

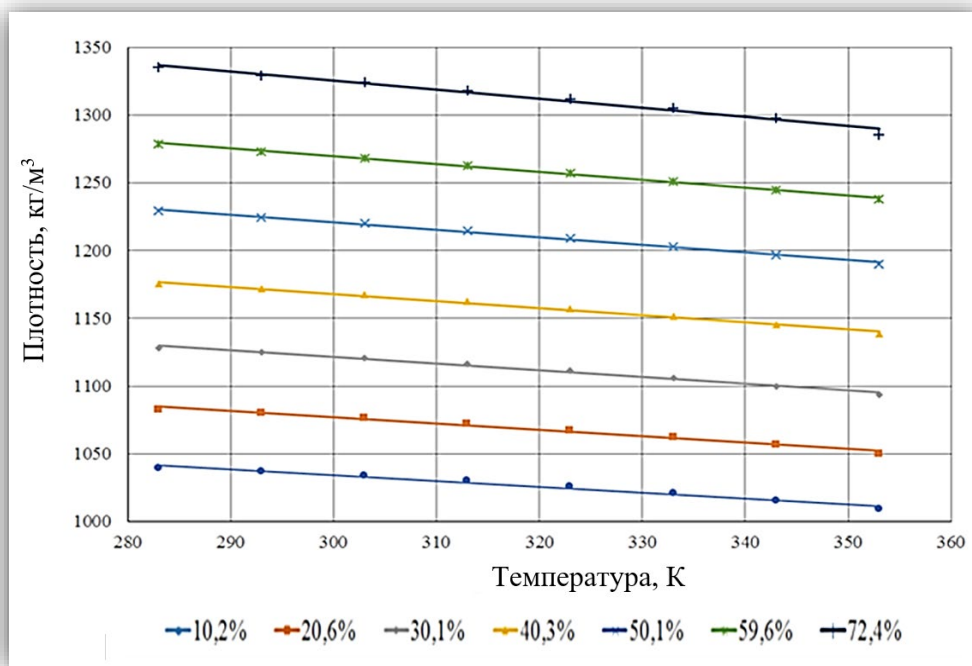


Рисунок 4 – Зависимость плотности охмеленного, отфильтрованного пивного сусла от температуры при различных концентрациях сухих веществ

Figure 4. The dependence of the density of hopped, filtered beer wort on temperature at various concentrations of solids

Учитывая тот факт, что оба объекта исследований предназначены для аэробного и анаэробного культивирования дрожжей одного рода в качестве питательных сред важно сопоставить их физические свойства, в частности плотность растворов.

Допуская, что качественный молекулярный состав обоих объектов исследования сопоставим, и величина содержания сухих веществ определяется в основном целевыми сахарами, данные по плотности растворов в зависимости от содержания СВ были совмещены. Результаты представлены на рисунке 5.

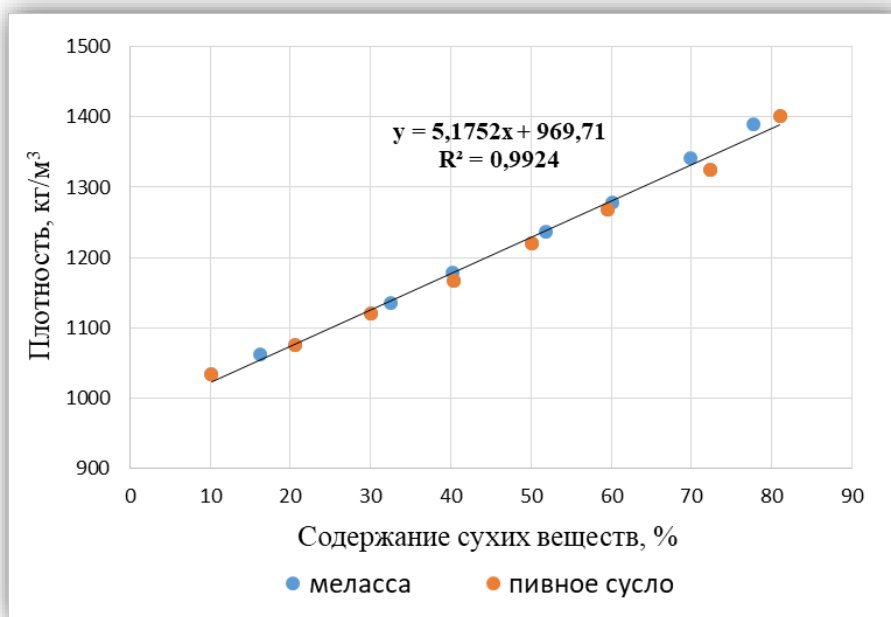


Рисунок 5 – Зависимость плотности водных растворов мелассы и концентрата пивного сусла от содержания СВ при температуре 303К

Figure 5. Dependence of the density of aqueous solutions of molasses and beer wort concentrate on the content of dry matter at a temperature of 303K

Как видно из графика, представленного на рисунке 5, плотности обоих растворов исследуемых объектов, лежат на одной прямой, что в общем случае говорит об идентичности их составов с точки зрения количественного содержания моно- и олигосахаридов.

Выводы

1. Экспериментальные исследования плотности водных растворов мелассы и концентрата пивного сула в диапазоне содержания сухих веществ от 0 до 81 масс.% при различных температурах от 283К (10°C) до 363К (90°C) позволили получить новые данные по плотности изученных объектов исследований в табличной, графической и математической формах (8),(9) и сравнить их с ранее опубликованными результатами;

2. Водные растворы мелассы и пивного сула являются идентичными растворами с точки зрения количественного содержания в их составах моно- и олигосахаридов, что подтверждается практически одинаковыми значениями плотности при соответствующих значениях СВ и Т.

3. Для подтверждения идентичности объектов исследования с точки зрения качественного состава в дальнейшем предполагается проведение комплексных исследований их вязкостных свойств и установление зависимостей коэффициентов динамической и кинематической вязкости от концентрации сухих веществ в водных растворах при различных температурах.

4. Полученные данные позволят более объективно подойти к постановке экспериментов в области изучения молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы в питательных средах биотехнологических производств.

Литература

1. Аткинсон Б. Биохимические реакторы. М.: Пищевая промышленность, 1979. 280 с.
2. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. Рига: Зинатне, 1986. 174 с.
3. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Дужий А.Б. Разработка и проектирование оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2014. 92 с.
4. Новоселов А.Г. Интенсификация массообмена между газом и жидкостью и разработка высокоэффективных аппаратов для пищевой и микробиологической промышленности: дис. ... д-ра. техн. наук. СПб., 2002. 362 с.
5. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива. СПб., Профессия, 2001. 912 с.
6. Нарцисс Л. Краткий курс пивоварения. СПб.: Профессия, 2007. 640 с.
7. Новаковская С.С., Шишацкий Ю.И. Справочник по производству хлебопекарных дрожжей. М.: Пищевая промышленность, 1980. 375 с.
8. Travnichek 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
9. 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
10. 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.
11. Božikova 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.
12. Hlavach P., Božikova M. Comparison of topvar beer rheological and thermophysical properties. *The Scientific Journal for Agricultural Engineering.* 2013, V. 15, Is. 1, pp. 23–27.
13. Махмуд А.К. Влияние кратности разбавления мелассы и расхода воздуха на кинетику роста дрожжей при периодическом культивировании в аппаратах барботажного типа: дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2007, 100 с.
14. Главачек Ф., Лхотский А. Пивоварение. М.: Пищевая промышленность, 1977. 630 с.
15. Дарков Г.В., Вишняков И.Г. Определение вязкости сула и пива // Известия СПбГУНиПТ, 2001. № 1.

References

1. Atkinson B. *Biochemical reactors.* Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1979. 280 p.
2. Viestur U.E., Kuznetsov A.M., Savenkov V.V. *Fermentation systems.* Riga, Zinatne Publ., 1986. 174 p.
3. Novoselov A.G., Gulyaeva Yu.N., Duzhiy A.B. *Development and design of equipment for aerobic cultivation of unicellular microorganisms.* St. Petersburg, ITMO University Publ., 2014. 92 p.
4. Novoselov A.G. Intensification of mass transfer between gas and liquid and the development of highly efficient devices for the food and microbiological industries. *Candidate's thesis.* St. Petersburg, 2002. 362 p.

5. Kuntze V., Mit G. *Technology of malt and beer*. St. Petersburg, Professija Publ., 2001. 912 p.
6. Narcissus L. *A short course in brewing*. St. Petersburg, Professija Publ., 2007. 640 p.
7. Novakovskaya S.S., Shishatsky Yu.I. *Handbook for the production of baker's yeast*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1980. 375 p.
8. Travnichek 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
9. 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
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Mahmud A.K. Influence of the multiplicity of molasses dilution and air consumption on the kinetics of yeast growth during periodic cultivation in bubble-type apparatuses. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, 2007, 100 p.
14. Glavachek F., Lhotsky A. *Brewing*. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1977. 630 p.
15. Darkov G.V., Vishnyakov I.G. Determination of the viscosity of wort and beer. *Izvestiya SPbGUNIPT*, 2001, no. 1.

Информация об авторах

Ольга Алексеевна Суздальцева – магистрант факультета биотехнологий

Екатерина Александровна Фомина – магистрант факультета биотехнологий

Александр Геннадьевич Новоселов – д-р тех. наук, профессор, преподаватель факультета биотехнологий

Сергей Антонович Сорокин – аспирант, ассистент факультета энергетики и экотехнологий

Игорь Владимирович Баранов – д-р тех. наук, профессор, директор мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем, доцент факультета энергетики и экотехнологий

Евгения Владимировна Кравцова – канд. тех. наук, старший преподаватель факультета биотехнологий

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

Information about the authors

Olga A. Suzdaltseva, Undergraduate of the of Biotechnology

Ekaterina A. Fomina, Undergraduate, Faculty of Biotechnology

Alexander G. Novoselov, Dr. Sci., Professor, Lecturer of the Faculty of Biotechnology

Sergey A. Sorokin, Postgraduate Student, Assistant of the Faculty of Energy and Ecotechnology

Igor V. Baranov, Dr. Sci., Professor, Head of School of Biotechnology and Cryogenic Systems, Associate Professor of the Faculty of Energy and Ecotechnology

Evgeniya V. Kravtcova, Ph. D., Senior Lecturer of the Faculty of Biotechnology

Yuliya N. Gulyaeva, Ph.D., Researcher

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

Статья поступила в редакцию 19.04.2022

Одобрена после рецензирования 03.06.2022

Принята к публикации 06.06.2022

The article was submitted 19.04.2022

Approved after reviewing 03.06.2022

Accepted for publication 06.06.2022