

Improving the Energy Efficiency of a Shell-and-Tube Jet-injection Fermenter for Aerobic Cultivation of Microorganisms

¹Loginov A.Yu., ¹Novoselov A.G., ¹Fedorov A.A., ¹Baranov I.V., ²Fedorov A.V.,

¹Rumiantseva O.N., ¹Chebotar A.B.

¹ ITMO University

² All-Russian Research Institute of Fats

St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The main objective of the study is to improve energy efficiency of a shell-and-tube jet injection fermenter (SJT) for aerobic cultivation of microorganisms. The relevance of the work is determined by the biotechnology industry's need to transition to energy-efficient cultivation processes. Using high biomass concentrations increases specific productivity, yet creating such bioreactors requires precise knowledge of thermophysical and mass transfer properties of dense suspensions, which are currently lacking. To achieve the stated goal, the following tasks were solved: a scientific literature review; development of an experimental methodology; selection of research objects (water-suspended *Saccharomyces cerevisiae* at 4.81–20.17 wt.% ADY); analysis of rheological behavior and thermal constants from 10 to 50°C (283.15–323.15 K) with 10°C steps; and derivation of regression equations. The most important results are experimentally established heat and mass transfer patterns. The existence of limiting concentration, at which the nature of the suspension flow changes fundamentally, was discovered. It was revealed that at low shear rate gradients, water-yeast suspension behaves like pseudoplastic fluids, but with an increase in the velocity gradient, their behavior becomes characteristic of dilatant fluids. Also, after 30°C thermal conductivity - previously declining- began to rise, likely as yeast cells perished. The significance of the obtained results lies in their further use in laboratory testing of the characteristics of supplied raw materials, in choosing technological modes for culturing microorganisms in production, as well as in heat and mass transfer calculations in the design of modern apparatus designs.

Keywords: energy efficiency, water-yeast suspension, aerobic cultivation, *saccharomyces*, thermophysical properties, viscosity, density, mass transfer, fermenters, biotechnology.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2026.2-70.09>

UDC: 665.6.035.6:536.2.081.7:536.632

Îmbunătățirea eficienței energetice a unui fermentor cu injecție cu jet de tip „țevi și manta” pentru cultivarea aerobă a microorganismelor

¹Loghinov A.Yu., ¹Novoselov A.G., ¹Fedorov A.A., ¹Baranov I.V., ²Fedorov A.V., ¹Rumianțeva O.N.,

¹Cebotar A.B.

¹ITMO Universitatea, ²Institutul de Cercetare al Grăsimilor din Rusia, Sankt Petersburg, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivul principal al studiului este de a îmbunătăți eficiența energetică a unui fermentator cu injecție cu jet (SJT) de tip „țevi și manta” pentru cultivarea aerobă a microorganismelor. Relevanța lucrării este determinată de necesitatea industriei biotehnologice de a trece la procese de cultivare eficiente din punct de vedere energetic. Utilizarea concentrațiilor mari de biomasă crește productivitatea specifică, însă crearea unor astfel de bioreactoare necesită cunoștințe precise ale proprietăților termofizice și de transfer de masă ale suspensiilor dense, care în prezent lipsesc. Pentru a atinge obiectivul stabilit, au fost rezolvate următoarele sarcini: o analiză a literaturii științifice; dezvoltarea unei metodologii experimentale; selectarea obiectelor de cercetare (*Saccharomyces cerevisiae* în suspensie de apă la 4.81–20.17% greutate ADY); analiza comportamentului reologic și a constantelor termice de la 10 la 50°C (283.15–323.15 K) cu trepte de 10°C; și derivarea ecuațiilor de regresie. Cele mai importante rezultate sunt modelele de transfer de căldură și masă stabilite experimental. A fost descoperită existența unei concentrații limită, la care natura fluxului suspensiei se schimbă fundamental. S-a constatat că la gradienti de viteză de forfecare mici, suspensia apă-drojdie se comportă ca fluide pseudoplastice, dar odată cu creșterea gradientului de viteză, comportamentul lor devine caracteristic fluidelor dilatante. De asemenea, după 30°C, conductivitatea termică - anterior în scădere - a început să crească, probabil pe măsură ce celulele de drojdie au pierit. Semnificația rezultatelor obținute constă în utilizarea lor ulterioară în testarea de laborator a caracteristicilor materiilor prime furnizate, în alegerea modurilor tehnologice de cultivare a microorganismelor în producție, precum și în calculele de transfer de căldură și masă în proiectarea aparatelor moderne.

Cuvinte-cheie: eficiență energetică, suspensie apă-drojdie, cultivare aerobă, *saccharomyces*, proprietăți

© Логинов А.Ю., Новоселов А.Г., Федоров

А.А., Баранов И.В., Федоров А.В.,

Румянцева О.Н., Чеботарь А.В., 2026

Повышение энергоэффективности кожухотрубного струйно-инжекционного ферментатора для аэробного культивирования микроорганизмов

¹Логинов А.Ю., ¹Новоселов А.Г., ¹Федоров А.А., ¹Баранов И.В., ²Федоров А.В., ¹Румянцева О.Н.,
¹Чеботарь А.В.

¹Университет ИТМО, ²ВНИИЖиров, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Основной целью исследования является повышение энергетической эффективности кожухотрубного струйно-инжекционного ферментатора (КСИА), используемого для аэробного культивирования микроорганизмов. Актуальность работы обусловлена потребностью биотехнологической отрасли в переходе к энергоэффективным и высокопроизводительным процессам аэробного культивирования. Ключевым направлением такого развития является культивирование микроорганизмов при высоких концентрациях биомассы. Это позволяет радикально увеличить удельную производительность аппаратов. Однако, создание биореакторов для таких режимов невозможно без точных знаний о теплофизических и массообменных свойствах плотных суспензий, которые в настоящее время отсутствуют. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи: проведен обзор и анализ научно-технической литературы, который позволил выявить проблему недостатка данных о тепло-массообменных свойствах ВДС; разработка методики экспериментальных исследований; подобраны объекты исследования (ВДС рода *Saccharomyces cerevisiae* с концентрацией от 4.81 до 20.17 масс.% АСД); проанализировано реологическое поведение и значения тепловых констант ВДС в диапазоне температур от 10 до 50°C (283.15-323.15 К) с дискретностью 10°C; получены расчетные регрессионные уравнения. Наиболее важными результатами являются экспериментально установленные закономерности тепломассопереноса. Обнаружено существование предельной концентрации биомассы, при которой принципиально меняется характер течения суспензии. Выявлено, что при малых градиентах скорости сдвига ВДС ведут себя как псевдопластичные жидкости, однако с ростом градиента скорости их поведение становится характерным дилатантным жидкостям. Показано, что доминирующим фактором, влияющим на изменение коэффициента температуропроводности исследованных суспензий, является температура. Значимость полученных результатов состоит в их дальнейшем использовании при лабораторной проверке характеристик поставляемого сырья, при выборе технологических режимов культивирования микроорганизмов на производстве, а также тепломассообменных расчётах при проектировании современных конструкций аппаратов.

Ключевые слова: энергоэффективность, водно-дрожжевая суспензия, аэробное культивирование, сахаромицеты, термофизические свойства, вязкость, плотность, массоперенос, ферментеры, биотехнология.

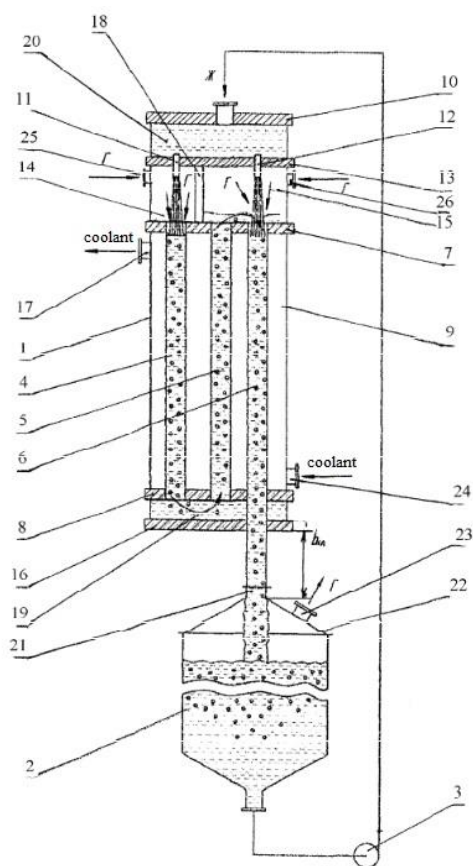
ВВЕДЕНИЕ

В пищевой и микробиологической промышленности одним из перспективных конструкций ферментаторов являются кожухотрубные струйно-инжекционные аппараты (КСИА) [1], совмещающие функции теплообмена, перемешивания и рециркуляции продукта в одном объёме. Особенностью конструкции аппарата, представленного на Рис. 1 являются новые технические решения относительно подачи газовой фазы в аппарат, ее диспергирования в питательной среде, увеличения времени и поверхности контакта газовой и жидкостной фаз, в частности отсутствие необходимости установки водонагревателей.

Конструкционно, КСИА включает в себя кожухотрубный теплообменник, вертикальные опускные и подъёмные трубы и струйно-инжекционный узел, создающий циркуляцию и диспергирование фазы за счёт

кинетической энергии струи, без отдельной мешалки. Аппарат работает в связке с емкостью-накопителем; сырьё (сусло, раствор мелассы) циркулирует через теплообменную часть, где нагрев/охлаждение совмещён с инжектированием и интенсификацией массообмена.

Проведение процесса при высоких концентрациях позволили повысить объёмы культивирования. Данные конструктивные решения позволяют интенсифицировать тепломассообмен за счёт высокоскоростных струй, уменьшить зоны застоя и работать с вязкими культуральными средами, где классические кожухотрубные теплообменники демонстрируют ограниченные коэффициенты теплопередачи и повышенные гидравлические потери.



- 1 – теплообменник-аэратор, 2 – емкость-накопитель, 3 – циркуляционный насос, 4 – опускная труба, 5 – подъемная труба, 6 – сливная труба, 7 – верхняя трубная решетка, 8 – нижняя трубная решетка, 9 – корпус, 10 – верхняя крышка, 11 – основное сопло, 12 – дополнительное сопло, 13 – горизонтальная перегородка, 14 – верхняя газовая емкость, 15 – дополнительная газовая емкость, 16 – нижняя крышка, 17 – патрубок для подвода хладагента, 18 – вертикальная перегородка, 19 – нижняя жидкостная емкость, 20 – верхняя жидкостная емкость, 21 – приемный патрубок, 22 – верхняя крышка емкости-накопителя, 23 – патрубок для отвода отработанного воздуха, 24 – патрубок для отвода хладагента, 25 – патрубок для подвода газа (основной камеры), 26 – патрубок для подвода газа (дополнительной камеры).

Рис. 1. Конструкция КСИА для аэробного культивирования микроорганизмов ¹

В результате появляется потенциал для снижения металлоёмкости, удельного расхода пара и электроэнергии при нагреве, охлаждении и пастеризации питательных сред.

Данные аппараты используют для производства широкого спектра продуктов:

получение газированных напитков, молочной сыворотки, фруктовых и овощных соков, хлебопекарных дрожжей (культивирование биомассы), пива (на стадиях культивирования биомассы и сбраживания сусла), этанола, олифы (на стадиях окислительного растительного масла).

Схема управления ферментатором на базе КСИА ориентирована на поддержание оптимальных условий аэробного культивирования дрожжей при минимальных удельных энергозатратах. В автоматическом режиме контролируются температура культуральной жидкости, расход рециркулируемой суспензии через сопла, расход воздуха на аэрацию, давление, уровень, pH и концентрация растворённого кислорода. Исполнительными органами служат циркуляционный насос с частотным приводом, регулирующие клапаны подачи хладагента в межтрубное пространство, регулирующий орган в линии воздуха, дозирующие насосы подачи мелассы и пеногасителя. Температура поддерживается за счёт регулирования расхода хладагента через кожухотрубную часть КСИА, а интенсивность перемешивания и струйно-инжекционного режима — за счёт управления расходом культуральной жидкости через сопла.

Расход воздуха и режим аэрации задаются так, чтобы обеспечивать целевой уровень растворённого кислорода при минимально необходимой мощности воздухоподогревателя, без избыточной продувки. Одновременный учёт гидродинамики и свойств водно-дрожжевой суспензии позволяет выбирать такие значения расхода жидкости и газа, при которых коэффициенты тепло- и массообмена в зоне сопел и труб максимальны, а насосная и компрессорная мощности — минимальны. Таким образом, система управления не только поддерживает биотехнологические параметры процесса, но и реализует потенциал энергоэффективности струйно-инжекционного ферментатора за счёт оптимизации циркуляции, теплообмена и аэрации.

Особый интерес при использовании КСИА представляет его применение в процессах аэробного культивирования микроорганизмов, при производстве дрожжей. Для таких биотехнологических систем решающим оказывается не только эффективный теплообмен и минимизация

удельных энергозатрат на перекачку, но и способность аппарата обеспечивать однородность среды, поддерживать оптимальный температурный режим и способствовать интенсификации массообмена между клетками и окружающей жидкой фазой.

Дрожжи рода *Saccharomyces cerevisiae* на сегодняшний день широко используются в пищевой, пивоваренной, биотехнологической и фармацевтической промышленности как активные ферментационные среды, побочные продукты производства и модельные объекты для изучения процессов теплопереноса [2]. При этом водно-дрожжевые суспензии представляют собой гетерогенные дисперсные системы, в которых процессы тепло- и массообмена определяются совместным влиянием гидродинамики, реологических свойств и теплофизических характеристик компонентов. Теплоперенос в таких системах описывается уравнением теплопроводности.

Массоперенос импульса (вязкость) определяет гидродинамическое сопротивление и распределение скорости в аппарате. Для ньютоновских суспензий динамическая вязкость η и кинематическая вязкость $\nu = \eta / \rho$ связаны с расходами энергии на перемешивание и перекачку. При росте концентрации дрожжей ($\varphi > 0.05-0.10$) суспензия часто переходит в неньютоновское состояние, что требует использования обобщённых моделей реологических законов. Имея надежные данные для расчета, можно подобрать оптимальную скорость перемешивания, минимизируя энергию на преодоление гидродинамического сопротивления (число мощности $N_p = f(\text{Re})$), особенно при переходе к неньютоновскому режиму.

Критическая роль физических и теплофизических свойств проявляется в расчёте критериальных уравнений для аппаратов химической технологии. Числа Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта напрямую зависят от плотности, вязкости и теплопроводности. Без точных экспериментальных данных по этим параметрам в диапазоне рабочих температур и концентраций расчёт коэффициентов тепло- и массоотдачи, времени прогрева/охлаждения и мощности перемешивания оказывается недостаточно надёжным, особенно при масштабировании процессов [3]. В результате

время прогрева/охлаждения уменьшается, а расход теплоносителя (пара, горячей воды, хладагента) снижается.

Основной целью является повышение производительности ферментатора КСИА за счет ускорения этих процессов, что связано с турбулизацией жидкостной фазы [4]. Несмотря на распространенность турбулентного режима работы ферментаторов, молекулярные механизмы переноса также играют роль, особенно для процессов, происходящих в рабочем объеме аппарата [5].

Проектирование ферментаторов часто подразумевает использование критериальных уравнений, основанных на экспериментальных данных, включая коэффициенты молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы. Их влияние на энергопотребление КСИА можно выразить в том числе через критерии тепло- и массообмена (Re , Pr , Nu) и гидравлического сопротивления (1), (2).

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}, \text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (1)$$

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \rightarrow k = \frac{\text{Nu} \lambda}{d} \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м^3 ; v – характерная скорость потока, м/с ; d – характерный размер, м ; μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$; c_p – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$; λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$.

При расчете этих коэффициентов учитываются такие параметры как: кинематическая вязкость, температуропроводность и молекулярная диффузия, которые также входят в классические уравнения молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы.

Чем точнее учтены вышеупомянутые параметры, тем надёжнее оценка Nu и k для конкретного режима струйно-инжекционного течения, а следовательно – и требуемой площади теплообмена (3).

$$A = \dot{Q} / (k \Delta T_{lm}) \quad (3)$$

где A – требуемая площадь поверхности теплообмена, м^2 ; \dot{Q} – тепловой эффект, Дж/с ; k – общий коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$; ΔT_{lm} – логарифмический

средний температурный напор между горячим и холодным теплоносителями, град.

Одновременно гидравлический расчёт и определение перепада давления Δp позволяют связать конструктивные параметры струйного узла с мощностью насоса $N=Q\Delta p/\eta$, что даёт возможность регулировать режим работы по критерию «максимальный тепловой поток при минимальных удельных затратах энергии».

Подавляющая часть расчетов КСИА была проведена с использованием данных по воде [6, 7], что не позволяет судить о влиянии свойств конкретной среды на этот процесс. К тому же, в условиях работы аппарата в условиях аэробного культивирования при высоких концентрациях биомассы, диапазон температур и концентраций имеющихся исследований не позволяет точно оценить процессы, происходящие в рабочем объеме аппарата.

Основным направлением работы является установка влияния физических параметров состояния объектов исследований на коэффициенты молекулярного переноса. Для этого необходимо экспериментально изучить влияние процессов молекулярного переноса на физические и теплофизические свойства культуральных жидкостей, а также получить данные по коэффициентам молекулярного переноса в широком диапазоне концентраций и температур.

В большинстве работ таких исследований как Фальч, Кляйн, Захарцев и др. [8–15] физические и теплофизические свойства водно-дрожжевых систем изучены фрагментарно, обычно для узких диапазонов концентраций, температур и часто только для вязкости, тогда как плотность, теплопроводность, температуропроводность и теплоёмкость либо вовсе не измеряются, либо оцениваются косвенно. При этом оптимальная температура роста дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae* находится в диапазоне 30–35 °С (303–308 К) [16, 17].

Наиболее полными являются данные, представленные в справочнике Новаковской и Шишацкого [18], в которой приведены значения плотности, динамической вязкости, удельной теплоемкости и теплопроводности водно-дрожжевых концентратов в диапазоне изменения температуры 275–295 К и для диапазона изменения концентраций СВ от 1.25 масс% до 16.25 масс%. Авторы представили экспериментальные данные в табличном и математическом вариантах.

Однако, авторами не были обозначены методы и приборы, с помощью которых были проведены исследования.

В работе Мореси и др. [19] рассмотрено реологическое поведение суспензий хлебопекарных дрожжей в воде при различных концентрациях и температурах. Показано, что при 30 °С (303 К) и концентрациях до порядка 150 кг/м³ суспензия ведёт себя как ньютоновская жидкость, а при повышении температуры и доли твёрдой фазы проявляется сдвигозависимая вязкость. Аналогичные наблюдения подтверждены в работах Кремаско и Бофо [20, 21]. Авторы используют ротационную реометрию (коаксиальные цилиндры) и динамические температурные испытания в диапазоне 5–40 °С.

Однако, в работе рассматривается только вязкость и реологическое поведение без параллельных измерений плотности, теплопроводности и теплоёмкости; концентрации дрожжей нормируются в единицах, затрудняющих прямое сопоставление с массовой долей; отсутствуют корреляционные зависимости для инженерных расчётов (например, в виде универсальных уравнений от температуры и концентрации).

В работе Москера [22] показано, что механическое разрушение клеток ведёт к росту вязкости и выраженному неньютоновскому поведению, что важно для расчёта процессов центрифугирования. Однако, состав жидкой фазы задаётся как «водная» среда без точной характеристики, что осложняет перенос результатов на чисто водные суспензии.

В одной из работ Ваурис и др. [23] по теплопереносу в системах твёрдофазной ферментации показано, что параметры гранулометрии, насыпной плотности и индекса Карра оказывают наибольшее влияние на скорость нагрева и охлаждения слоя, а также на максимальную температуру, иллюстрируя важность детальной физико-химической характеристики биосубстрата. Авторы используют фракционный факторный план эксперимента для оценки влияния этих параметров на теплопередачу в аэрируемом слое. Однако, в данной работе объектом исследований являются твёрдые субстраты, данные жидкой фазы отсутствуют.

В работе Фальч [8] по динамическому определению тепловых характеристик ферментационных чанов оценивается эффективная удельная теплоёмкость субстрата (около 0.95 кал/г·К) на основе теплового баланса при небольших возмущениях температуры. При этом авторы подчёркивают, что физические свойства бульона предполагаются постоянными в узком температурном интервале эксперимента, а точный диапазон температурных изменений невелик (порядка нескольких градусов).

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение физических и теплофизических свойств культуральных жидкостей прямыми измерениями невозможно, так как в процессе измерений клетки микроорганизмов, при наличии питательной среды в культуральной жидкости, будут неизбежно дышать, выделяя в нее продукты метаболизма – газовую фазу [9].

Для того, чтобы оценить степень влияния количества клеток микроорганизмов на физические и теплофизические свойства культуральных жидкостей были проведены исследования с водно-дрожжевыми суспензиями, в которых активное дыхание дрожжей исключалось априори, ввиду отсутствия углеводов и различного рода веществ стимулирующих средств. Фактически клетки микроорганизмов находились в анабиозе, не изменяя своих размеров, количества и не влияя на фазовый состав объектов исследований.

Исследуемые водно-дрожжевые суспензии были приготовлены путём последовательного разведения дрожжевого молока в дистиллированной воде. В качестве исходного материала было использовано дрожжевое молоко — высококонцентрированная суспензия свежих хлебопекарных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. В результате были получены суспензии со следующими концентрациями: 4.81 масс% АСД; 9.71 масс% АСД; 17.68 масс% АСД и 20.17 масс% АСД. Температура, при которой определялись искомые величины, варьировалась от 10°C (283 К) до 50°C (323 К).

Идентификация объектов исследований была начата с определения концентрации

сухих веществ в водно-дрожжевых суспензиях.

Содержание сухих веществ в образцах определялось методом высушивания в вакуум-сушильном шкафу [24] при 100–105°C (373–378 К) до постоянной массы. Концентрация биомассы в суспензии определялась следующим образом: 10 мл культуральной жидкости переносили в пробирку, центрифугировали для отделения субстрата, промывали водой и вновь центрифугировали для удаления воды. Затем проба переносилась в высушенную и взвешенную бюксу, высушивалась при 105°C (378 К) в течение 12 часов и взвешивалась. Для оценки было отобрано не менее трех проб. После взвешивания бюкс, с пробой, можно вычислить вес абсолютно сухих дрожжей (4) (АСД):

$$G_{АСД} = G_2 - G_1 \quad (4)$$

где G_1 – вес бюксы без пробы, г; G_2 – вес бюксы с пробой, г.

Полученные результаты усреднялись. Концентрация сухих веществ в пробе определялась при помощи уравнения (5):

$$X = \frac{G_{АСД}}{V_{пр}} \quad (5)$$

где $V_{пр}$ – объем исследуемой пробы, мл.

Каждая партия суспензии готовилась непосредственно перед серией измерений и использовалась в течение 2 часов, чтобы исключить седиментацию и биохимические изменения [14, 25]. Объем одной порции составлял 100–150 мл. Все образцы были предварительно термостатированы при каждой температуре не менее 30 минут для установления теплового равновесия.

Измерения плотности объектов исследования выполнялись объемно-массовым методом и на электронном плотномере марки MettlerToledo Excellence D4. Измерения реологических свойств объектов исследований проведены на шариковом вискозиметре Гепплера и на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1.

Поскольку требовался незначительный объем исследуемой пробы, а также ввиду отсутствия необходимости проведения измерений при достаточно низких температурах, был выбран анализатор

теплофизических свойств, основанный на принципе нестационарного плоского источника тепла (TPS) Hot Disk TPS 2500S [26].

Метод измерения предполагает размещение термочувствительного сенсора и регистрацию температурного отклика при импульсном нагреве. Дрожжевые суспензии оседают из-за разности плотностей клеток и жидкой фазы что приводит к расслоению. Сенсор в центре фиксирует сначала однородную суспензию, но по мере оседания получает данные по обеднённой верхней зоне, завышая теплопроводность. Данная проблема устранена значительным уменьшением нахождения суспензии непосредственно в измерительной ячейке. Эффективность устранения осаждения контролировалась временной стабильностью: три повторных измерения подряд с интервалом 30 с давали воспроизводимость $\pm 1\%$. Это позволило проводить эксперимент, игнорируя осаждение взвешенных частиц твердой фазы.

Известны исследования в области модификации методов дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) и TPS для измерения нестандартных жидкостей [27–29]. Нестандартные жидкости могут включать высоковязкие жидкости, реакционные смеси, жидкости с низкими температурами плавления или высокими температурами кипения, а также суспензии. Однако, использование этих методов для долгосрочных экспериментов, продолжающихся более 10 минут, представляется сомнительным без всесторонней проверки на достоверность получаемых результатов.

Перед загрузкой в аппарат суспензия подвергалась дегазации в вакуумной камере (остаточное давление 10–20 кПа, 5–10 минут) до полного удаления растворённого и эволюционирующего газа.

Во всех экспериментальных сериях использовалась предварительно откалиброванная измерительная аппаратура, калибровка выполнялась по эталонным материалам. Для каждого значения

температуры и концентрации проводилось не менее трёх независимых измерений, по результатам которых рассчитывались средние значения контролируемых параметров и оценивалась воспроизводимость (стандартное отклонение).

В результате измерений получены данные, позволившие получить зависимости плотности водно-дрожжевых суспензий от температуры при указанных выше концентрациях сухих дрожжей. Обработка измерений производилась при помощи регрессионного анализа.

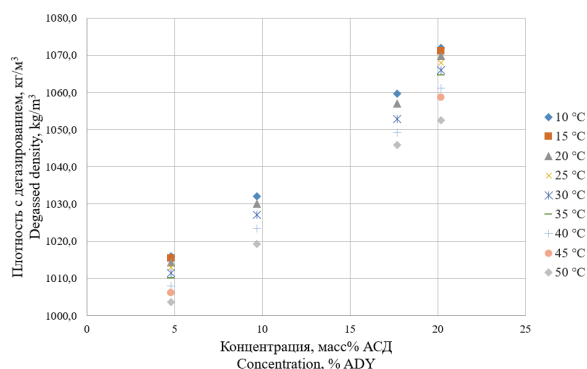


Рис. 2. Зависимость плотности ВДС от концентрации АСД²

Из результатов измерения плотности на Рис. 2 заметна линейная зависимость между концентрацией дрожжевой суспензии и плотностью водно-дрожжевой суспензией. Это косвенно подтверждает, что при составлении объектов исследований в водно-дрожжевых суспензиях присутствовали только вода и биомасса,

На Рис. 3 представлена графическая зависимость плотности водно-дрожжевой суспензии (ВДС) от температуры.

При рассмотрении данных по каждой температуре общая тенденция заключается в том, что плотность увеличивается с повышением концентрации суспензии. Это можно объяснить наличием большего количества квазитвердых частиц (дрожжей) в суспензии, что приводит к увеличению общей массы в единице объема.

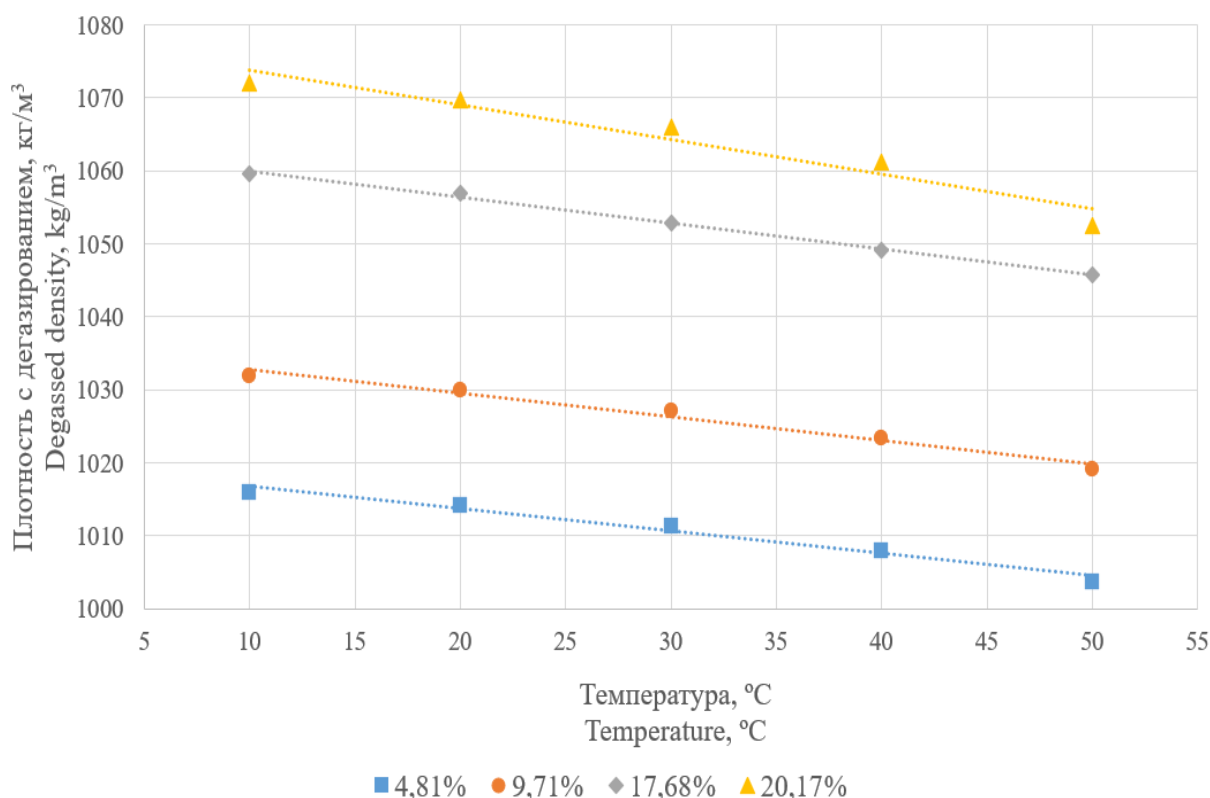


Рис. 3. Зависимость плотности ВДС от температуры для ВДС с концентрациями 4.81; 9.71; 17.68; 20.17 масс% АСД³

Уравнение для расчета значений плотности, после обработки экспериментальных данных с использованием температурно-инвариантного метода приобретает следующий вид:

$$\rho_{\text{вдс}} = \rho_s \cdot (1 + 0.0035 \cdot n) \quad (6)$$

где ρ_s – плотность воды при соответствующей температуре, kg/m^3 , n – концентрация ВДС, масс% АСД.

Данная формула справедлива при значениях T от 10 до 50°C и n от 4.81 до 20.17 масс%, $R^2 = 0.99$.

На Рис. 4 представлена зависимость коэффициентов динамической вязкости ВДС с концентрацией равной 20.17 масс%, при изменении температуры от 15 до 50°C и изменении градиента скорости сдвига от 5.01 до 500 s^{-1} .

Результаты в некоторой степени подтверждают заключение, представленное в литературе, согласно которому водно-дрожжевая суспензия начинает проявлять неньютоновские свойства лишь при концентрациях биомассы свыше 16.25 масс%

АСБ [19]. Из графика видно, что характер течения ВДС при малых скоростях сдвига (от 1 s^{-1} до 100 s^{-1}) соответствует псевдопластичным жидкостям, но при дальнейшем увеличении градиента скорости характер течения становится таким, которые свойственны дилатантным жидкостям.

Влияние температуры на динамическую вязкость не выявило аномалий в характере течения. С увеличением температуры ВДС коэффициент динамической вязкости снижался, что наблюдалось у всех объектов исследований.

Также были проведены измерения динамической вязкости образцов с использованием аппарата Rheotest (Рис. 5). Для перевода динамической вязкости в кинематическую использована формула (7):

$$\nu = \eta / \rho \quad (7)$$

где ν — кинематическая вязкость, m^2/s , η — динамическая вязкость, $\text{mPa}\cdot\text{s}$, ρ — плотность среды kg/m^3 .

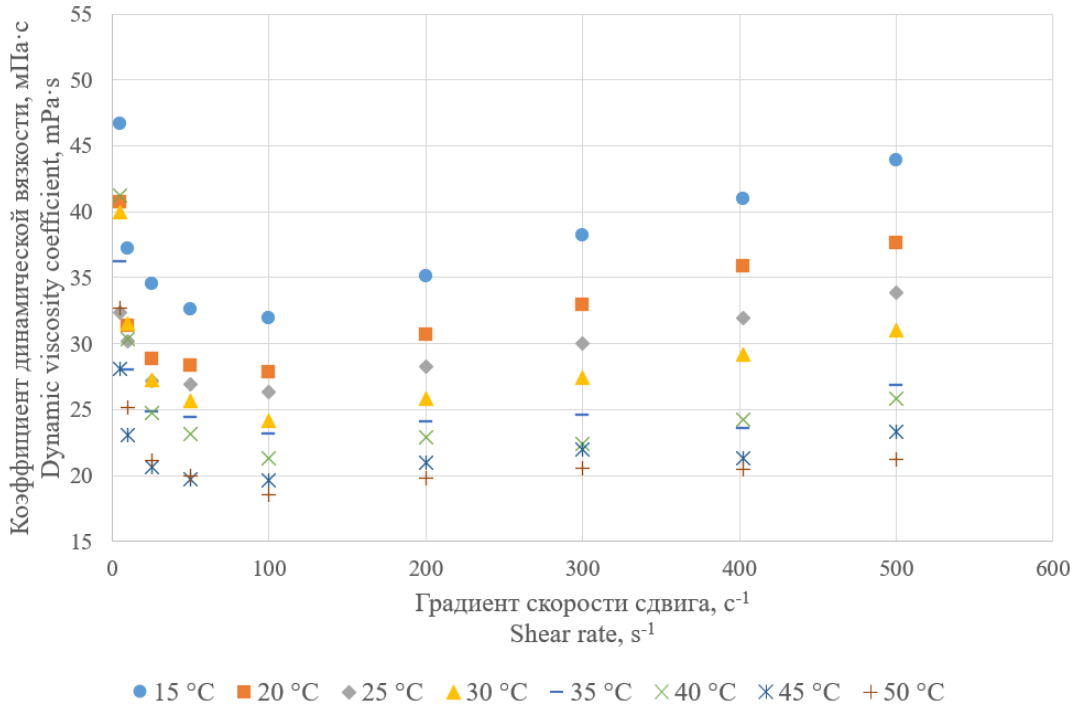


Рис. 4. Зависимость динамической вязкости ВДС с концентрацией 20.17 масс% АСД от скорости сдвига, при различной температуре ⁴

Уравнение для расчета значений кинематической вязкости (8) приобретает следующий вид:

$$v_{вдс} = 0.000494 - 0.0002 \cdot T + 0.001021 \cdot n \quad (8)$$

где T – температура ВДС, °С; n – концентрация ВДС, масс% АСД.

Данная формула справедлива при значениях T от 10 до 50°С и n от 4.81 до 20.17 масс%, $R^2 = 0.85$.

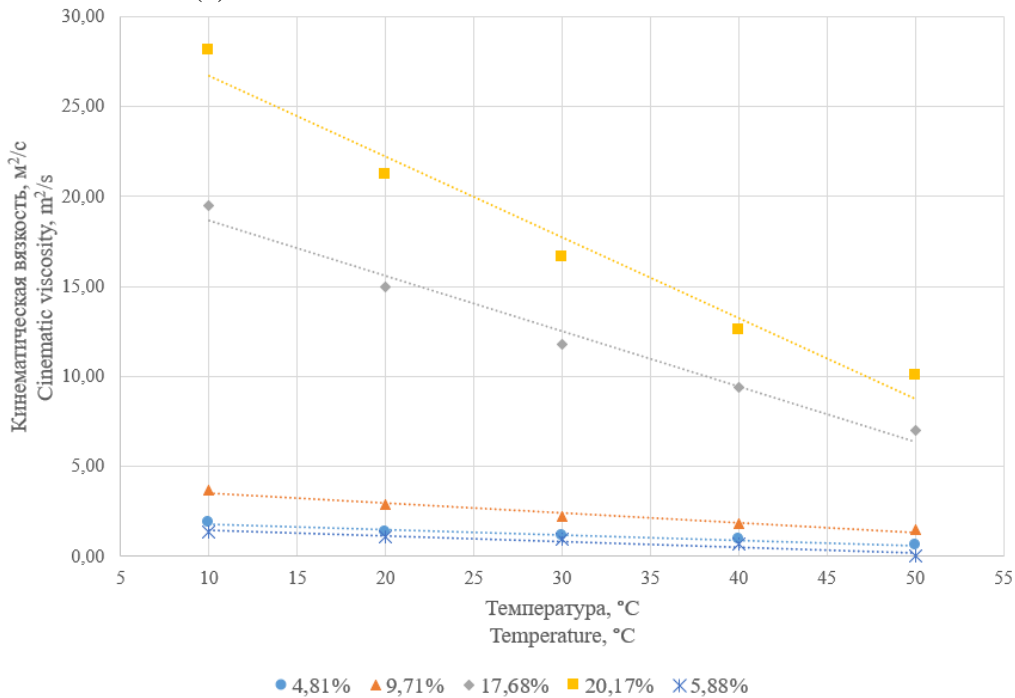


Рис. 5. Зависимость значений кинематической вязкости ВДС от температуры для суспензий различных концентраций ⁵

На Рис. 6 представлена зависимость коэффициента теплопроводности ВДС от температуры в графическом выражении

Из анализа результатов, представленных в виде графических зависимостей на рисунке 6 видно, что при увеличении концентрации суспензии происходит уменьшение теплопроводности. Это может быть связано с увеличением количества твердых частиц в суспензии, что способствует менее

эффективной передаче тепла. В зависимости от температуры одной концентрации, в частности на диапазоне 30–50 °С, замечен скачок с последующим увеличением коэффициента теплопроводности. Это может быть связано с физиологией живых клеток, направленной на их внутреннюю терморегуляцию, в условиях резкого повышения температуры.

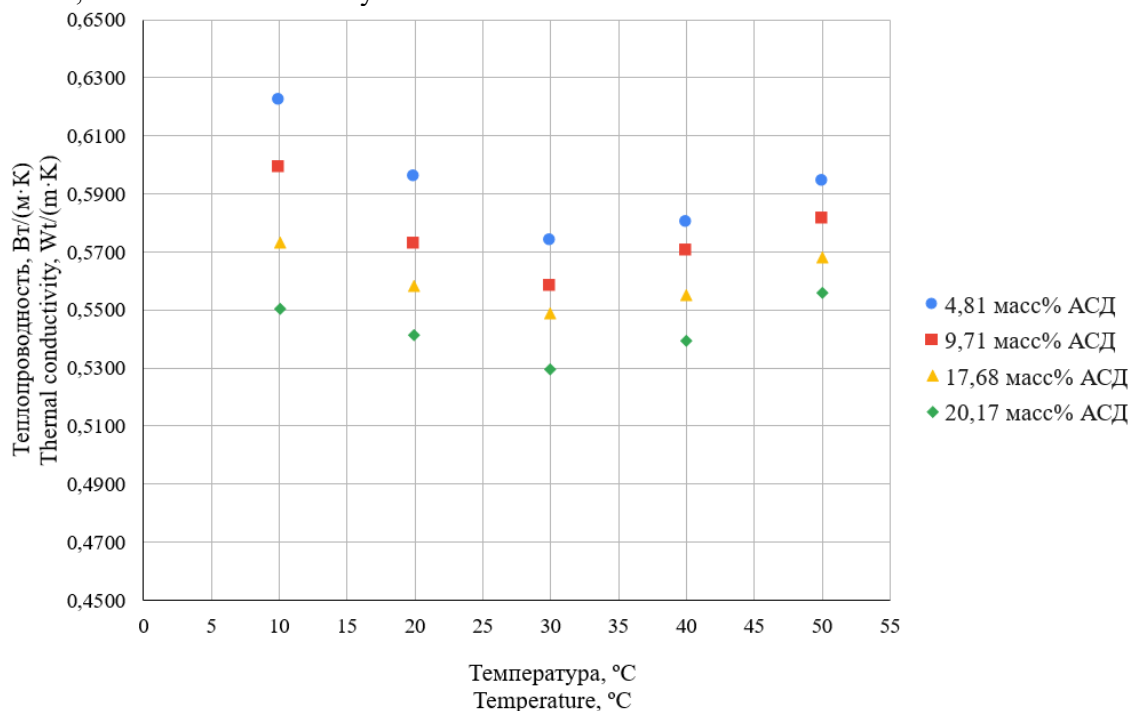


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности ВДС от температуры ⁶

При анализе данных каждого уровня концентрации можно заметить следующие тенденции: при повышении температуры от 10 до 50°C общая теплопроводность уменьшается. Это типичное поведение для многих материалов, так как с увеличением температуры возрастает амплитуда тепловых колебаний, что затрудняет передачу тепла.

В пределах каждой температуры наблюдается некоторое изменение теплопроводности с изменением концентрации суспензии. Например, при 10°C теплопроводность снижается с увеличением концентрации, в то время как при 30°C наблюдается некоторое увеличение теплопроводности с ростом концентрации.

Уравнение для расчета коэффициента теплопроводности представлено следующей формулой (9):

$$\lambda_{вдс} \cdot 10^3 = \lambda_в \cdot 1.053 \cdot n^{-0.526} \quad (9)$$

где $\lambda_в$ – значение теплопроводности воды для заданной температуры, Вт/(м·К).

Данная формула справедлива при значениях T от 10 до 50°C и n от 4.81 до 20.17 масс%. Максимальное относительное отклонение от экспериментальных данных при расчетах с помощью данной формулы составило $\pm 5\%$, что является приемлемым для расчета теплофизических свойств.

На Рис. 7 представлена зависимость коэффициента температуропроводности ВДС от температуры в графическом выражении.

Общий тренд показывает, что, при постоянной температуре, температуропроводность водно-дрожжевой суспензии снижается с увеличением концентрации суспензии. Это может быть связано с увеличением количества дисперсных частиц в суспензии, что препятствует эффективной передаче тепла и затрудняет проникновение тепловой энергии через материал.

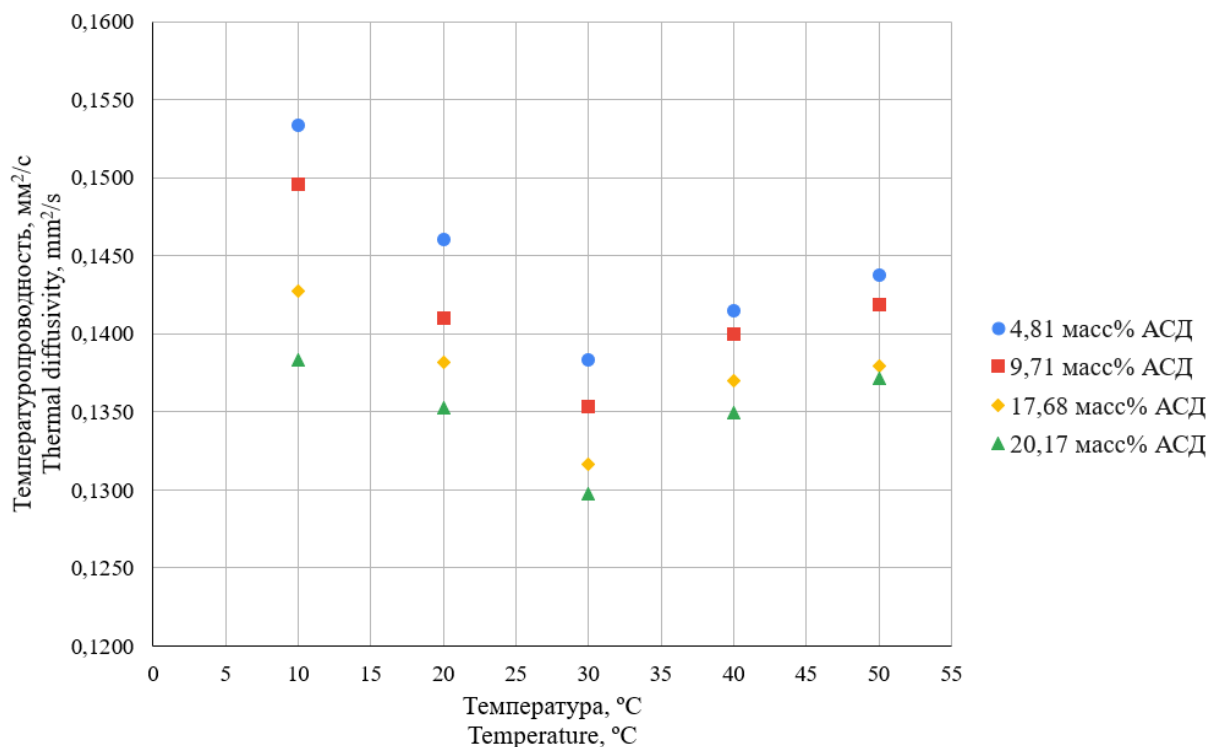


Рис. 7. Зависимость коэффициента температуропроводности ВДС от температуры ⁷

Минимальные значения температуропроводности наблюдались у всех исследованных объектов при температуре 30°C, что характерно для дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae*, которые обладают максимальной скоростью роста как раз при данной температуре.

Незначительное повышение температуропроводности при более высоких температурах может быть обусловлено структурными изменениями клеток под воздействием высоких температур.

Путем обработки экспериментальных данных было получено уравнение (10) для расчета коэффициента температуропроводности ВДС:

$$\alpha_{вдс} = \alpha_в \cdot 1.056 \cdot n^{-0.044} \quad (10)$$

где $\alpha_в$ – значение температуропроводности воды при заданной температуре, мм²/с.

Данная формула справедлива при значениях T от 10 до 50°C и n от 4.81 до 20.17 масс%. Максимальное относительное отклонение от экспериментальных данных при расчетах с помощью данной формулы составило $\pm 5.7\%$.

На Рис. 8 представлена зависимость удельной изобарной теплоемкости ВДС от температуры в графическом изображении. При увеличении концентрации суспензии

наблюдается повышение удельной теплоемкости, которая имеет линейный характер зависимости, особенно заметной при концентрации 9.71 масс% и выше. На диапазоне 30 и 40°C наблюдается заметный скачок удельной теплоемкости, связанный с изменением структуры клеток и нарушением их внутренней терморегуляции.

Похожее поведение также отражено в работе [30], где авторы проводили измерение удельной теплоемкости прессованных дрожжей.

Сравнение значений удельной теплоемкости ВДС с данными, представленными в работах, показывают удовлетворительный результат.

Путем математической обработки температурно-инвариантным методом была получена расчетная формула изобарной удельной теплоёмкости (11):

$$Cp_{вдс} = Cp_{вод} - 16.76 \cdot (n + 5.81) \quad (11)$$

где $Cp_{вод}$ – удельная теплоёмкость воды при заданной температуре, мДж/(м²·К).

Данная формула справедлива при значениях T от 10 до 50°C и n от 4.81 до 20.17 масс%. Максимальное относительное отклонение от экспериментальных данных при расчетах с помощью данной формулы составило $\pm 2.9\%$.

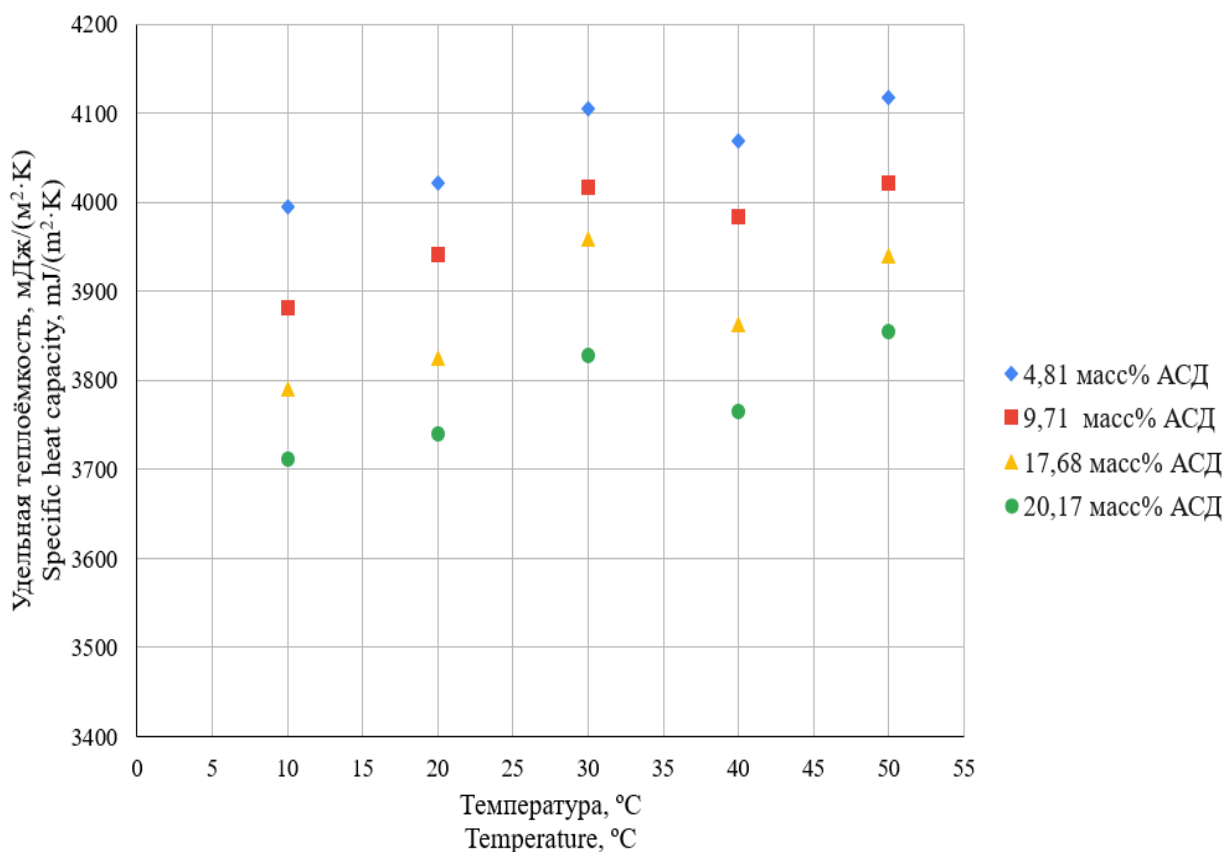


Рис. 8. Зависимость удельной изобарной теплоемкости ВДС от температуры при постоянном давлении.⁸

ВЫВОДЫ

В результате проведённой работы подтверждён высокий потенциал КСИА с точки зрения энергоэффективности при аэробном культивировании. Ключевым фактором в проведенном исследовании является учёт физических и теплофизических свойств водно-дрожжевых суспензий (ВДС) с их зависимостями от температуры и концентрации биомассы.

Показано, что введение в теплогидравлический расчёт теплофизических и реологических свойств водно-дрожжевых суспензий их зависимостей от температуры и концентрации биомассы позволяет существенно уточнить расчетные критерии и гидравлическое сопротивление, что, в свою очередь, повышает достоверность определения требуемой площади теплообмена, а также насосной мощности.

По результатам экспериментальных исследований реологических свойств водно-дрожжевых суспензий было установлено, что ВДС при малых градиентах скорости сдвига ($1-100 \text{ c}^{-1}$) ведут себя как псевдопластичные жидкости, в то время как с увеличением

поведение становится свойственно дилатантным жидкостям. К тому же, вещества питательной среды придают суспензии пластифицирующий эффект. С энергетической точки зрения, работа в зоне дилатантного течения резко повышает вязкость, что ведёт к неоправданному росту потребляемой мощности. Это особенно критично для высоких концентраций, поскольку с её повышением данный эффект усиливается. Очень важно рассчитывать подачу в зависимости от концентрации в конце ферментации. Подача может отличаться на разных штаммах из-за влажности клетки до 10%. Наибольшее влияние повышенной вязкости на технологический процесс оказывает последняя ступень сепарации.

Обнаружено, что в диапазоне температур $10-30 \text{ }^\circ\text{C}$ коэффициенты теплопроводности и температуропроводности ВДС снижаются, а выше $30 \text{ }^\circ\text{C}$ внутренние процессы жизнедеятельности клеток замедляются, либо вовсе сходят на нет.

Работа выше $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ведёт к росту энергозатрат на поддержание температуры и падению выхода биомассы на единицу вложенной энергии ввиду выхода из

диапазона рекомендуемых для культивирования температур.

Полученные зависимости свойств ВДС от температуры и концентрации биомассы позволяют задавать минимально достаточную скорость в соплах КСИА, обеспечивающую турбулизацию и эффективный массо-теплообмен, но без перерасхода электроэнергии на преодоление избыточной вязкости; рассчитывать тепловую нагрузку и коэффициент теплопередачи так, чтобы снизить либо металлоёмкость теплообменника, либо перепад температур между средой и теплоносителем а также внедрять системы автоматизированного управления, которые в реальном времени удерживают КСИА в области максимальной энергоэффективности.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Design of a SJT for aerobic cultivation of microorganisms (1 – heat exchanger-aerator, 2 – storage tank, 3 – circulation pump, 4 – downpipe, 5 – lifting pipe, 6 – drain pipe, 7 – upper tube sheet, 8 – lower tube sheet, 9 - body, 10 - upper cover, 11 – main nozzle, 12 – additional nozzle, 13 – horizontal partition, 14 - upper gas tank, 15 - additional gas tank, 16 - lower cover, 17 – coolant supply pipe, 18 – vertical partition, 19 – lower liquid tank, 20 – upper liquid tank, 21 – receiving pipe, 22 – upper cover of the storage tank, 23 – pipe for exhaust air removal, 24 – pipe for removal coolant, 25 – gas supply pipe (main chamber), 26 – gas supply pipe (additional chamber)).

²**Fig. 2.** Dependence of density of water-yeast suspension (WYS) on ADY concentration.

³**Fig. 3.** Temperature dependence of density of WYS for WYS with concentrations of 4.81; 9.71; 17.68; 20.17 wt% ADY.

⁴**Fig. 4.** Dependence of the dynamic viscosity of water-yeast suspension with a concentration of 20.17 wt% ADY on the shear gradient, at different temperatures.

⁵**Fig. 5.** Dependence of values of dynamic viscosity of WYS on temperature for suspensions of different concentrations.

⁶**Fig. 6.** Temperature dependence of thermal conductivity coefficient of WYS.

⁷**Fig. 7.** Temperature dependence of thermal diffusivity of WYS.

⁸**Fig. 8.** Dependence on specific heat capacity of WYS on temperature at constant pressure.

Литература (References)

[1] Sivenkov A.V. e.a. *Shell-and-tube jet-stream fermenter*. Patent RF, no. RU2305464C1. 2007.

В совокупности, каждое уточнённое физическое и теплофизическое свойство ВДС трансформируется в возможность снизить удельное энергопотребление КСИА (кВт·ч на кг готового продукта) при сохранении или даже увеличении выхода биомассы.

Дальнейшие исследования предполагается направить на разработку энергооптимальных алгоритмов управления тепло-массообменными процессами в биотехнологических аппаратах данного типа, а также уточнение коэффициентов переноса массы (молекулярной диффузии) растворённого диоксида углерода (CO₂) в водные растворы культуральных жидкостей, участвующих в процессе культивирования.

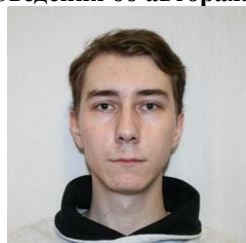
- [2] Nabieva F.S., Kudratova Z.E., Kuvandikov G.B. Rol Saccharomyces cerevisiae v razvitii sovremennoy biotekhnologii [The role of Saccharomyces cerevisiae in the development of modern biotechnology]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2021, vol. 5, no. 77, pp. 57–60. (In Russian).
- [3] Liu S. Bioreactor design and operation. *Bioprocess Engineering*. Elsevier. 819–856.
- [4] Buryachenko S. Molekulyarnaya genetika drozhzhey sakharomitsetov [Molecular genetics of Saccharomyces yeasts]. *LAP LAMBERT Academic Publishing*. 2025, pp. 74.
- [5] Dutta D., Kumar P., Singh A., Khade S. Bioprocess strategies for enhanced performance in single-use bioreactors for biomolecule synthesis: A biokinetic approach. *Food Bioengineering*. 2024, vol. 3, no. 3, pp. 337–351. doi: 10.1002/fbe2.12104.
- [6] Shakouchi T., Kito M., Tsuda M., Tsujimoto K., Ando T. Flow and Heat Transfer of Impinging Jet from Notched-Orifice Nozzle. *Journal of Fluid Science and Technolgy*. 2011, vol. 6, no. 4, pp. 453–464. doi: 10.1299/jfst.6.453.
- [7] Fan L.-S., Lau R., Zhu C., Vuong K., Warsito W., Wang X., Liu G. Evaporative liquid jets in gas–liquid–solid flow system. *Chemical Engineering Science*. 2001, vol. 56, no. 21–22, pp. 5871–5891. doi: 10.1016/S0009-2509(01)00283-4.
- [8] Falch E.A. Dynamic determination of the thermal characteristics of fermentation tanks. *Biotechnology and Bioengineering*. 1968, vol. 10, no. 2, pp. 233–237. doi: 10.1002/bit.260100209.
- [9] Álvarez-Cao M.-E., Cerdán M.-E., González-Siso M.-I., Becerra M. Bioconversion of Beet Molasses to Alpha-Galactosidase and Ethanol. *Frontiers in Microbiology*. 2019, vol. 10, pp. 405. doi: 10.3389/fmicb.2019.00405.

- [10] Bryjak W., Meissner W. Concentration of Baker's Yeast Suspension by Means of Membrane Enhanced Drying. *Chem. Pap.* 2003, vol. 57, no. 1, pp. 11–15.
- [11] Tangüler H., Erten H. The Effect of Different Temperatures on Autolysis of Baker's Yeast for the Production of Yeast Extract. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry.* 2009. doi: 10.3906/tar-0803-17.
- [12] Klein J., Maia J., Vicente A.A., Domingues L., Teixeira J.A., Juraščík M. Relationships between hydrodynamics and rheology of flocculating yeast suspensions in a high-cell-density airlift bioreactor. *Biotechnology and Bioengineering.* 2005, vol. 89, no. 4, pp. 393–399. doi: 10.1002/bit.20335.
- [13] Zakhartsev M., Reuss M. Cell size and morphological properties of yeast *Saccharomyces cerevisiae* in relation to growth temperature. *FEMS Yeast Research.* 2018, vol. 18, no. 6. doi: 10.1093/femsyr/foy052.
- [14] Beugholt A., Geier D.U., Becker T. Improvement of *Saccharomyces* propagation performance through oxygen-enriched air and aeration parameter variation. *Frontiers in Chemical Engineering.* 2023, vol. 5, pp. 1193230. doi: 10.3389/fceng.2023.1193230.
- [15] Eliodório K.P., Cunha G.C.D.G.E., Lino F.S.D.O., Sommer M.O.A., Gombert A.K., Giudici R., Basso T.O. Physiology of *Saccharomyces cerevisiae* during growth on industrial sugar cane molasses can be reproduced in a tailor-made defined synthetic medium. *Scientific Reports.* 2023, vol. 13, no. 1, pp. 10567. doi: 10.1038/s41598-023-37618-8.
- [16] Wawro A. Genome Shuffling as an Alternative Method of Improving the Properties of Distillery Yeast. *Postępy Mikrobiologii - Advancements of Microbiology.* 2018, vol. 57, no. 3, pp. 278–285. doi: 10.21307/PM-2018.57.3.278.
- [17] Guyot S., Gervais P., Young M., Winckler P., Dumont J., Davey H.M. Surviving the heat: heterogeneity of response in *Saccharomyces cerevisiae* provides insight into thermal damage to the membrane. *Environmental Microbiology.* 2015, vol. 17, no. 8, pp. 2982–2992. doi: 10.1111/1462-2920.12866.
- [18] Novakovskaya S.S., Shishatskiy Yu.N. Spravochnik po proizvodstvu khlebopekarnykh drozhzhey [Handbook on the production of baker's yeast]. *VO Agropromizdat.* 1990, pp. 336. (In Russian).
- [19] Mancini M., Moresi M. Rheological behaviour of baker's yeast suspensions. *Journal of Food Engineering.* 2000, vol. 44, no. 4, pp. 225–231. doi: 10.1016/S0260-8774(00)00030-3.
- [20] Cremasco M. A., Melo K. P. Rheological characterization of recovery yeast (*saccharomyces cerevisiae*) cream from brewing process. *Chemical Engineering Transactions.* 2010, vol. 21, pp. 763–768. doi: 10.3303/CET1021128.
- [21] Bofo D.C.S., Neto F.S.P.P., Andrietta S.R., Telis-Romero J. Rheological Behavior of Yeast Paste from the Ethanol Industry. *Industrial Biotechnology.* 2015, vol. 11, no. 3, pp. 160–166. doi: 10.1089/ind.2014.0025.
- [22] Mosqueira F.G., Higgins J.J., Dunnill P., Lilly M.D. Characteristics of mechanically disrupted bakers' yeast in relation to its separation in industrial centrifuges. *Biotechnology and Bioengineering.* 1981, vol. 23, no. 2, pp. 335–343. doi: 10.1002/bit.260230208.
- [23] Vauris A., Valcauda S., Husson F., Coninck J.D. A novel method to assess heat transfer and impact of relevant physicochemical parameters for the scaling up of solid state fermentation systems. *Biotechnology Reports.* 2022, vol. 36, pp. e00764. doi: 10.1016/j.btre.2022.e00764.
- [24] Ahn J.Y., Kil D.Y., Kong C., Kim B.G. Comparison of Oven-drying Methods for Determination of Moisture Content in Feed Ingredients. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.* 2014, vol. 27, no. 11, pp. 1615–1622. doi: 10.5713/ajas.2014.14305.
- [25] Parapouli M., Vasileiadi A., Afendra A.-S., Hatziloukas E., *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology.* 2020, vol. 6, no. 1, pp. 1–32. doi: 10.3934/microbiol.2020001.
- [26] Gustavsson M., Karawacki E., Gustafsson S.E. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors. *Review of Scientific Instruments.* 1994, vol. 65, no. 12, pp. 3856–3859. doi: 10.1063/1.1145178.
- [27] Almanza O., Rodríguez-Pérez M.A., De Saja J.A. Applicability of the transient plane source method to measure the thermal conductivity of low-density polyethylene foams: Transient Plane Source Method. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics.* 2004, vol. 42, no. 7, pp. 1226–1234. doi: 10.1002/polb.20005.
- [28] Starovoitov N.P., Lukin S.A., Korneev S.V., Kazakov V.A., Dudkin V.A., Kozlov P.V., Bobrova P.A. Adaptatsiya metoda DSC pod issledovaniya koeffitsienta teploprovodnosti poroshkoobraznykh materialov [Adaptation of the DSC method for studying the thermal conductivity coefficient of powdered materials]. *Traektoriya issledovaniy – chelovek, priroda, tekhnologii.* 2022, vol. 4, pp. 102–115. (In Russian).
- [29] Abdulagatov I.M., Abdulagatova Z.Z., Kallaev S.N., Bakmaev A.G., Ranjith P.G. Thermal-Diffusivity and Heat-Capacity Measurements of Sandstone at High Temperatures Using Laser Flash and DSC Methods. *International Journal of Thermophysics.* 2015, vol. 36, no. 4, pp. 658–691. doi: 10.1007/s10765-014-1829-4.

[30] Lukina D.V. Ekonomicheskaya effektivnost primeneniya sverkhvysokochastotnoy ustanovki dlya teplovogo vozdeystviya na pressovannye drozhzhi [Economic efficiency of using ultrahigh-frequency installation for thermal exposure on pressed yeast]. *Vestnik Chuvashskogo*

gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I. Ya. Yakovleva. 2013, vol. 2, no. 78, pp. 76–79. (In Russian).

Сведения об авторах.



Логинов Андрей Юрьевич
 Университет ИТМО, аспирант. Область научных интересов: теплофизические свойства биотехнологических сред
ORCID: 0009-0001-7940-3544
 E-mail: a.loginov@itmo.ru



Баранов Игорь Владимирович
 Университет ИТМО, д.т.н., профессор. Область научных интересов: энергоэффективные системы
ORCID: 0000-0003-0595-368X
 E-mail: ivbaranov@itmo.ru



Новоселов Александр Геннадьевич
 Университет ИТМО, д.т.н., профессор. Область научных интересов: энергоэффективность.
ORCID: 0000-0002-9432-7447
 E-mail: dekrosh@mail.ru



Федоров Алексей Александрович
 Университет ИТМО, к.т.н. Область научных интересов: биотехнология
ORCID: 0000-0003-3860-7708
 E-mail: aafedorov@itmo.ru



Федоров Александр Валентинович
 ВНИИЖиров, д.т.н., доцент. Область научных интересов: реологические свойства питательных сред
ORCID: 0000-0003-0030-3848
 E-mail: afedorov@itmo.ru



Румянцева Ольга Николаевна
 Университет ИТМО, к.т.н., доцент. Область научных интересов: процессы и аппараты пищевых производств
ORCID: 0000-0003-2032-6617
 E-mail: rumyantseva@itmo.ru



Чеботар Анастасия Викторовна
 Университет ИТМО, к.т.н. Область научных интересов: энергосбережение в биотехнологических процессах
ORCID: 0000-0001-7825-966X
 E-mail: avchebotar@itmo.ru