

ОЖИМКОВА Елена Владимировна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: eozhimkova@mail.ru

About the authors:

GLADKOVA Lyudmila Andreevna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gladckowa.mila@yandex.ru

OZHIMKOVA Elena Vladimirovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, Tver. E-mail: eozhimkova@mail.ru

УДК 639.64

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ СУСПЕНЗИИ CHLORELLA VULGARIS

Н.В. Кузнецов, О.Л. Ахремчик

© Кузнецов Н.В., Ахремчик О.Л., 2024

*Аннотация.* Предложен набор зависимостей, отражающих влияние температуры на вязкость раствора водоросли *Chlorella Vulgaris*. Указано, что в исследованиях применялись методы измерения на основе капиллярного вискозиметра. Получено, что модель связи между вязкостью суспензии и температурой на основе экспоненциального тренда обеспечивает минимальный коэффициент детерминации. Отмечено, что проведенные экспериментальные исследования позволяют констатировать наличие зависимости динамической вязкости от состава суспензии.

*Ключевые слова:* водоросль, измерение, кинематическая вязкость, динамическая вязкость, суспензия, состав, температура.

Системы измерения и контроля физических и химических параметров являются обязательной частью систем автоматизации процесса выращивания водоросли *Chlorella Vulgaris*. На кафедре автоматизации технологических процессов ведутся инициативные разработки по совершенствованию методов и приборов управления процессами роста водоросли [1]. Одной из задач, решению которой посвящен предлагаемый материал, является получение зависимостей, отражающих взаимное влияние контролируемых параметров. Полученная зависимость между параметрами позволяет заменять контуры систем автоматизации и

управления технологическим процессом, имеющих в своем составе дорогие и сложные в эксплуатации измерительные приборы верхнего уровня автоматизации [2]. В ходе исследований проведено изучение связи между вязкостью готовой суспензии «Природный стимулятор живая хлорелла» (производство ООО «Органик+», РФ) и температурой.

Измерение вязкости суспензии *Chlorella Vulgaris* (состав 1 : 7) проводилось с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-1 для трех значений температуры (20, 30 и 40 °С) по общепринятой методике [3]. Классически выполнялись три замера, по которым вычислялось среднее время истечения жидкости из капилляра:

$$T = (T1 + T2 + T3)/3,$$

где  $T$  – среднее значение времени истечения, с;  $T1, T2, T3$  – значения времени истечения в последовательных замерах, с.

Кинематическая вязкость суспензии рассчитывается как

$$\vartheta = \frac{g}{9.807} \cdot T \cdot K,$$

где  $\vartheta$  – кинематическая вязкость жидкости, мм<sup>2</sup>/с;  $K$  – постоянная вискозиметра;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Динамическая вязкость жидкости определяется как

$$\mu = \vartheta \cdot \rho,$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па · с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров суспензии водоросли

Температура раствора $t$ , °С	Среднее время истечения $T$ , с	Кинематическая вязкость $\vartheta$ , мм <sup>2</sup> /с	Динамическая вязкость $\mu$ , мПа · с	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
20	12,13	1,230 32	1,303	1 059,47
30	10,33	1,047 8	1,110	1 059,47
40	9,27	0,939 64	0,996	1 059,47

Суть второй стадии исследования заключалась в подборе вида зависимости между температурой и динамической вязкостью суспензии (рис. 1, 2) с расчетом коэффициента детерминации  $R^2$ .

Коэффициент детерминации для модели с экспоненциальным трендом выше, чем коэффициент у модели с линейным трендом. В связи с этим предлагается для системы управления процессом выращивания водоросли *Chlorella Vulgaris* использовать модель с экспоненциальным трендом, чтобы оценить влияние вязкости на температуру.

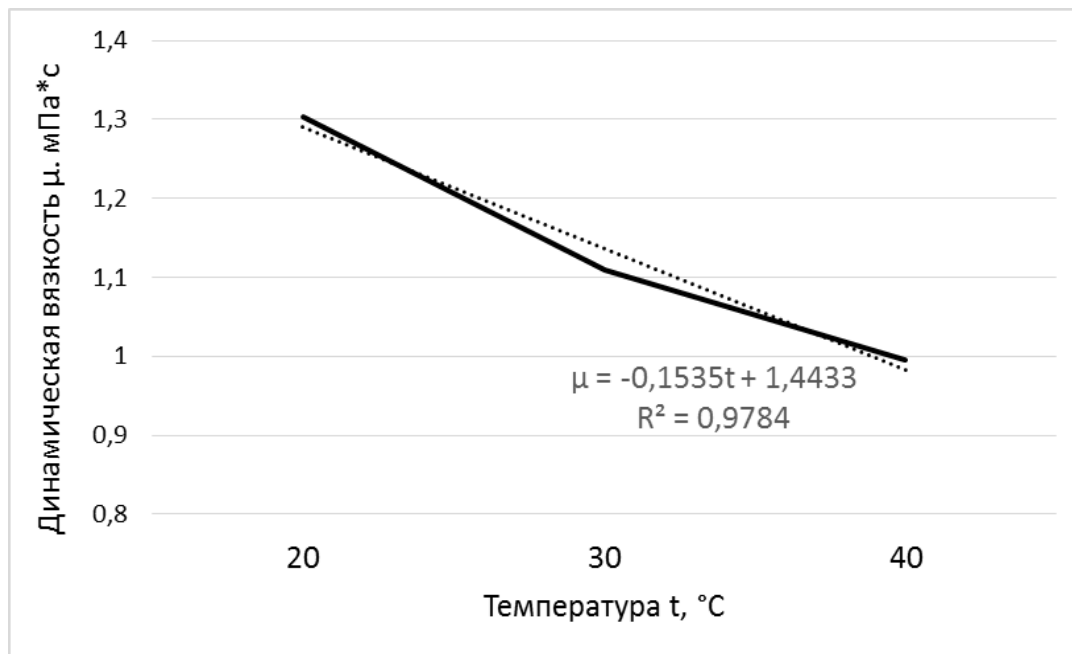


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости суспензии от температуры на основе модели линейного тренда

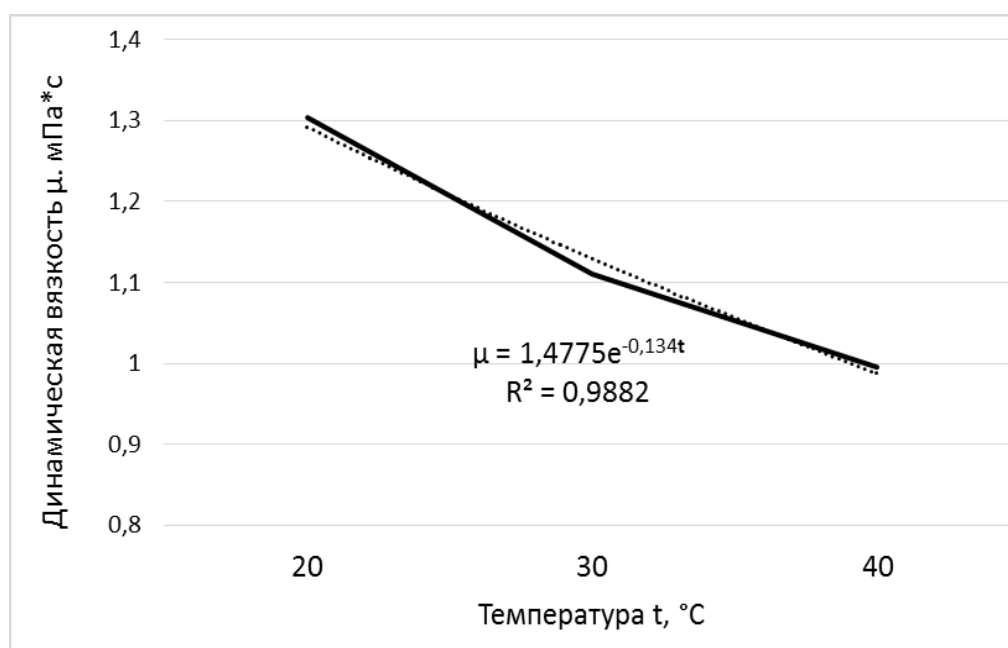


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости суспензии от температуры на основе модели экспоненциального тренда

Продолжение исследований предусматривало изучение зависимости вязкости суспензии от ее состава (табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений вязкости суспензии в зависимости от состава

Состав	Среднее время $T$ , с	Кинематическая вязкость $\vartheta$ , мм <sup>2</sup> /с	Динамическая вязкость $\mu$ , мПа · с	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1 : 7	11,03	1,118 1	1,129	1 010
1 : 9	10,89	1,104 2	1,113	1 008
1 : 12	10,71	1,086 0	1,087	1 001

Абсолютные погрешности измерения кинематической и динамической вязкости:

$$\Delta\vartheta = \Delta T \cdot K = 0,1 \text{ с} \cdot 0,101 4 = 0,010 14 \text{ мм}^2/\text{с};$$

$$\Delta\mu = \Delta\vartheta \cdot \rho + \Delta\rho \cdot \vartheta = 0,010 14 \cdot 1 010 + 0,1 \cdot 1,118 1 = 10,4 \cdot 10^{-3} \text{ мПа} \cdot \text{с}.$$

Относительная погрешность измерения находится в пределах 1 %.

Для выявления наличия связи между показателями вязкости и составом суспензии был произведен расчет коэффициента корреляции  $r = 0,985$ , значение которого близко к 1, что отражает наличие линейной связи между вязкостью и составом суспензии.

Полученные данные позволяют осуществить автоматическое измерение состава суспензии водоросли и заменить трудоемкий процесс прямого подсчета числа клеток в камере Горяева.

### Библиографический список

1. Ахремчик О.Л., Мурзахметов В.С. Моделирование роста штамма *Chlorella Vulgaris* в лабораторном биореакторе. Тольятти: ТГУ, 2023. С. 29–34.
2. Ахремчик О.Л., Житков В.В. Уровневая организация АСУ биореакторами // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 9. С. 4–9.
3. Чупаев А.В., Фафурин В.А. Измерение вязкости капиллярным методом с постоянной скоростью // Законодательная и прикладная метрология. 2008. № 6. С. 43–46.

## MEASUREMENT OF VISCOSITY OF CHLORELLA VULGARIS SUSPENSION

N.V. Kuznetsov, O.L. Akhremchik

**Abstract.** A set of dependences reflecting the effect of temperature on the viscosity of the alga *Chlorella Vulgaris* solution is proposed. It is indicated that the capillary viscometer-based measurement methods were used in the studies.

*It was obtained that the model of relationship between suspension viscosity and temperature on the basis of exponential trend provides the minimum coefficient of determination. It is noted that the conducted experimental studies allow us to state the existence of the dependence of dynamic viscosity on the suspension composition.*

**Keywords:** *algae, measurement, kinematic viscosity, dynamic viscosity, suspension, composition, temperature.*

Об авторах:

КУЗНЕЦОВ Николай Викторович – аспирант, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: nikola9841@gmail.com

АХРЕМЧИК Олег Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: axremchik@mail.ru

About the authors:

KUZNETSOV Nikolai Viktorovich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: nikola9841@gmail.com

AKHREMCHIK Oleg Leonidovich – Doctor of Science, Professor of Automation Department, Tver State Technical University, Tver. E-mail: axremchik@mail.ru

**УДК 663.53**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕРМЕНТНЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОСИНТЕЗА ЭТАНОЛА ИЗ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ**

**А.В. Уткина, Е.В. Ожимкова, М.Е. Григорьев**

**© Уткина А.В., Ожимкова Е.В.,  
Григорьев М.Е., 2024**

*Аннотация.* В статье отмечено, что роль биоэтанола как технического продукта в мировой и российской экономике постоянно возрастает, и это обусловлено широким спектром сфер его использования. Указано, что превращение лигноцеллюлозного сырья в этанол полностью соответствует принципам циркулярной экономики и отвечает концепции опережающего развития. Рассмотрены возможности оптимизации биотехнологического процесса путем использования