

Научная статья

УДК 66.083

DOI: 10.17586/2310-1164-2021-14-2-13-19

## Определение реологических свойств комбикормовой смеси с добавкой на основе бурых водорослей

И.В. Евтишин\*, И.А. Шорсткий

*Кубанский государственный технологический университет  
Краснодар, Россия, \*yevtishin@mail.ru*

**Аннотация.** Исследовали реологические характеристики комбикормовой массы с добавлением марикультуры бурых водорослей *Phaeophyceae* в диапазоне от 1 до 10 мас.%. С использованием математического аппарата была установлена реологическая модель течения изучаемой смеси. Наличие процессов структурообразования комбикормовой массы наиболее ярко проявлялось при высоких концентрациях измельченных водорослей (>6 мас.%). Установлено, что влияние концентрации измельченной массы водорослей (от 1 до 4 мас.%) характеризуется снижением предельного напряжения сдвига с 0,068 до 0,156 Па, которое приводит к снижению нагрузки на процесс экструдирования. Однако увеличение концентрации более 4 мас.% приводит к резкому росту предельного напряжения сдвига.

**Ключевые слова:** комбикормовое производство; аква добавка; марикультура экструдирование; реология; водоросли

Original article

## Rheological properties of a feed mix with brown algae-based additive

Ivan V. Evtishin\*, Ivan A. Shorstkii

*Kuban State Technological University  
Krasnodar, Russia, \*yevtishin@mail.ru*

**Abstract.** The article presents a research of rheological characteristics for mixed fodder mass with an addition of mariculture of brown algae *Phaeophyceae* in the range of from 1 to 10%. Using a mathematical apparatus, a rheological model of the flow of the mixture under study was established. Presence of structure formation processes for mixed fodder mass was most clearly shown at high concentrations of crushed algae (>6%). It is established that the influence of the crushed algae mass concentration (from 1 to 4%) is characterized by the reduction of the limiting shear stress from 0.068 to 0.156 Pa, which results in the reduction of the load on the extrusion process. However, an increase in the concentration above 4% results in a sharp increase in the shear stress limit.

**Keywords:** feed compound production; aqua additive; mariculture extrusion; rheology; algae

## Введение

Промышленное производство комбинированных кормов является относительно новым. В России этот рынок по состоянию на 2017 год оценивается более чем в 400 млрд руб. [1]. В предприятиях отрасли наряду с внедрением энергоэффективных технологий [2] широко применяют нетрадиционные виды сырья и вторичные ресурсы, получаемые при производстве пищевых продуктов [3, 4].

Морские водоросли, как объект марикультуры, широко зарекомендовали себя не только в качестве основы для биотоплива, но и как компонент в высокотехнологичных фармацевтических препаратах [5, 6]. Высокая биологическая активность, возможность выращивания в искусственных условиях и широкий ассортимент позволяют использовать такое сырье в промышленных масштабах [7].

Применение водорослей в качестве добавки комбикормовой массы широко известно, однако в ряде исследований отмечено изменение поведения течения комбикормовой смеси в процессах деформации в экструдере [8, 9]. Как результат – возникновение неоднородностей конечного продукта при экструдировании и отсутствие стабильности состава комбикорма. Подход к решению указанной проблемы в основном базируется на переборе вариаций технологических режимов [9], что не приводит к стабильному результату. Некоторыми авторами были установлены реологические свойства различных

аквакультур, в том числе бурых водорослей [10] и микроводорослей [11]. Отмечено [12], что по мере увеличения концентрации биомассы водорослей *C. pyrenoidosa* более 150 гр/литр поведение суспензии меняется с ньютоновской жидкости на неньютоновскую. Заметно скачкообразное увеличение величины вязкости. Авторами [10] установлено неньютоновское поведение суспензии водорослей *Chlorella sp* и *Scenedesmus sp.* на всем диапазоне скоростей сдвига от 0,67 до 6,7 с<sup>-1</sup>. Однако реологических данных комбикормовых масс с добавлением водорослей в литературе не представлено.

Для успешного внедрения аквадобавки в исходное комбикормовое сырье, выбора типоразмера экструдеров и каналов течения сырья, необходимы данные реологических свойств. Исходя из изложенного цель настоящего исследования – изучение реологических свойств комбикормовой массы в зависимости от количества внедряемой добавки на основе водорослей.

## Материалы и методы

В качестве биологической добавки для комбинированного корма были выбраны бурые водоросли *Phaeophyceae*, растущие в Черном море (Краснодарский край). Использовали водоросли, находящиеся в морской воде, которые предварительно хранили в темном месте при температуре 4°C. Для добавления такого типа сырья в процесс производства комбинированного корма, необходимо произвести подготовку сырья для дальнейшей обработки в экструдере.

**Подготовка материала.** Подготовку исследуемой массы проводили в соответствии с протоколами, представленными на рисунке 1. В протоколе А измельчение исходного материала водорослей влажностью 85% проводили на ножевом измельчителе до получения пюреобразной однородной массы. Далее определяли эффективную вязкость. В протоколе Б также получали измельченную массу водорослей, которую далее смешивали с основой комбикорма (сыпучая масса ячмень – 28%; пшеница – 25%; кукуруза – 29%; жмых подсолнечниковый – 8%, вода 10%). Представленная масса за счет наличия воды представляла собой текучую однородную массу. Массовую долю водорослей в итоговой смеси варьировали от 1 до 10 мас%. Влажность полученной смеси находилась на уровне 30–35%. Полученная концентрация влажности в смеси установлена в соответствии с рекомендациями, данными в [8, 13].

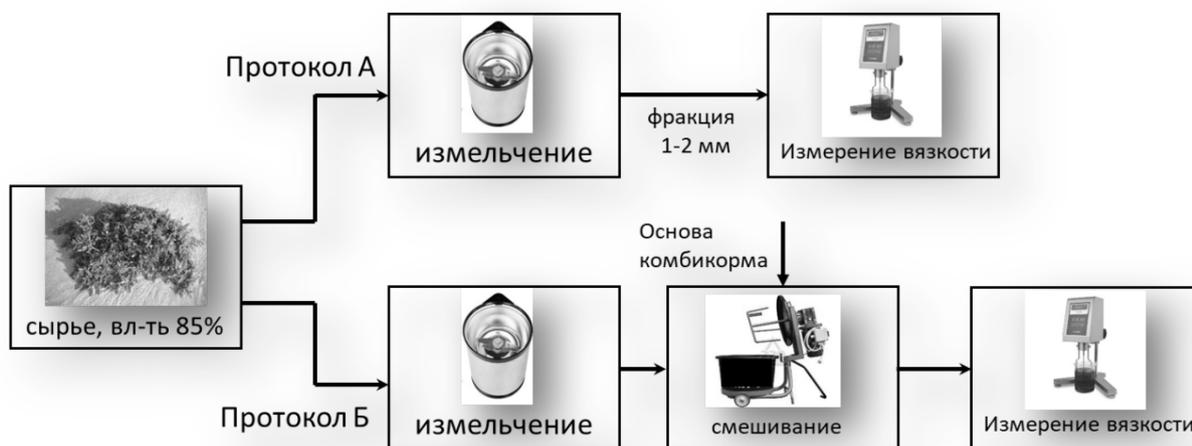


Рисунок 1 – Схема подготовки исследуемой массы для изучения вязкостных свойств  
Figure 1. Preparation of the mass under investigation to analyze its viscous properties

**Измерение вязкости.** Для выявления реологических свойств материала псевдопластичной формы, необходимо выявить эффективную вязкость материала [14, 15]. Идентификация течения вязкопластичного материала в канале экструдера основана на определении эффективной вязкости с помощью ротационного вискозиметра Fungilab One Pro (Fungilab, Испания). Ротор вискозиметра (L4) диаметром 6 мм использовали для диапазона скоростей сдвига от 1 до 10 с<sup>-1</sup>. Выбор ротационного способа измерения основан на возможности измерения вязкости как ньютоновских, так и неньютоновских [10], т.е. истинных и структурированных сред. Для исключения влияния возможных тиксотропных свойств

исследуемой массы регистрацию параметров эффективной вязкости в указанном диапазоне проводили не более 2 мин. Все реологические измерения проводили с тройной повторностью. Оценку достоверности экспериментальных данных проводили путем анализа показателя дисперсии и среднего абсолютного отклонения.

Опираясь на выводы, приведенные в [16], можно определить, что измеряемая вязкость связана с процессами структурообразования с увеличением скорости сдвига, измеряемая вязкость стремится к ньютоновской вязкости.

*Определение реологической модели.* Для определения реологической модели массы измельченных бурых водорослей (протокол А, рисунок 1) и комбикормовой смеси с добавлением измельченной массы водорослей рассматривали модель Бингама для пластичного течения по выражению

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu_{\text{пл}} \cdot \dot{\gamma},$$

где  $\tau_0$  – предел текучести, Па;

$\mu_{\text{пл}}$  – пластическая вязкость, Па·с;

$\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>.

Предположение о возможной Бингамовской модели течения были взяты на основе литературных данных реологических свойств суспензий водорослей [17].

*Статистическая обработка.* Полученные экспериментальные данные были статистически обработаны в программной среде MS Excel. Все эксперименты по определению эффективной вязкости проводились с трехкратной повторностью.

## Обсуждение и результаты

Большинство экструдированных масс ведут себя как неньютоновские жидкости. Данные реологической кривой, измельченных по протоколу А водорослей, представлены на рисунке 2.

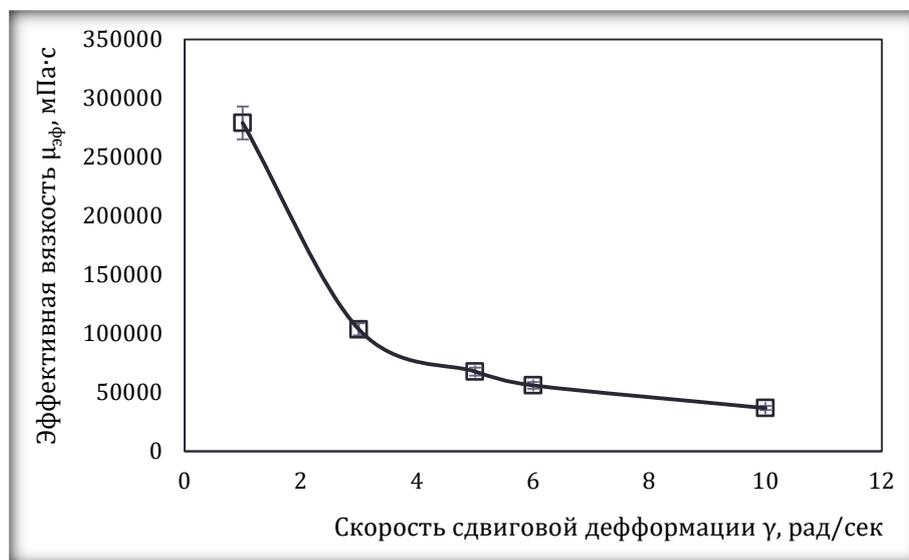


Рисунок 2 – Данные реологической кривой измельченных водорослей по протоколу А  
Figure 2. Rheological curve of the crushed algae according to A protocol

Как видно из реологической кривой, с увеличением скорости сдвиговой деформации величина эффективной вязкости монотонно снижается, что связано с возникающими процессами структурообразования измельченной массы водорослей. Аппаратная или эффективная вязкость, регистрируемая ротационным вискозиметром, представляет собой отношение напряжения к скорости сдвиговой деформации  $\mu_{\text{эф}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ . Произведем обработку первичных данных вязкостных свойств (таблица ).

Таблица. Вязкостные свойства материала  
Table. Viscous properties of the material

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$ , рад/сек	Напряжение сдвига $\tau$ , Па	Бингамовская модель $\tau_{бин}$ , Па	Невязка Бингамовской модели $(\tau - \tau_{бин})/\tau$	Доверительный интервал $\delta\tau/\tau$
0,11	29,21±0,7	30,22±0,87	3,45%	7,28%
0,31	32,5±0,86	32,16±1,2	1,05%	6,44%
0,52	35,42±0,54	34,11±0,95	3,70%	2,94%
0,63	35,11±0,71	35,08±0,89	0,10%	2,36%
1,04	38,29±0,92	38,97±0,85	1,77%	8,32%

Обработка полученных экспериментальных данных показывает, что уравнение течения в рассмотренном диапазоне скоростей сдвиговой деформации от 0,11 до 1,04 рад/сек в канале экструдера может быть описано идеально-пластической модели Бингама. Из анализа полученных данных линейной аппроксимации следует, что  $\tau_0 = 20,249 \pm 0,87$  Па,  $\mu_{пл} = 9,28 \pm 0,68$  Па·с для измельченной массы водорослей.

Влияние добавки водорослей на вязкость комбикормовой массы. Данные эксперимента по протоколу Б (рисунок 1) по определению влияния добавки водорослей на вязкостные свойства комбикормовой массы представлены на рисунке 4 в осях десятичного логарифма эффективной вязкости – скорость сдвиговой деформации. Вариативной величиной является количество добавляемых водорослей в диапазоне от 1 до 10 мас%. С увеличением концентрации измельченных водорослей происходит рост величины эффективной вязкости массы во всем диапазоне скорости сдвиговой деформации.

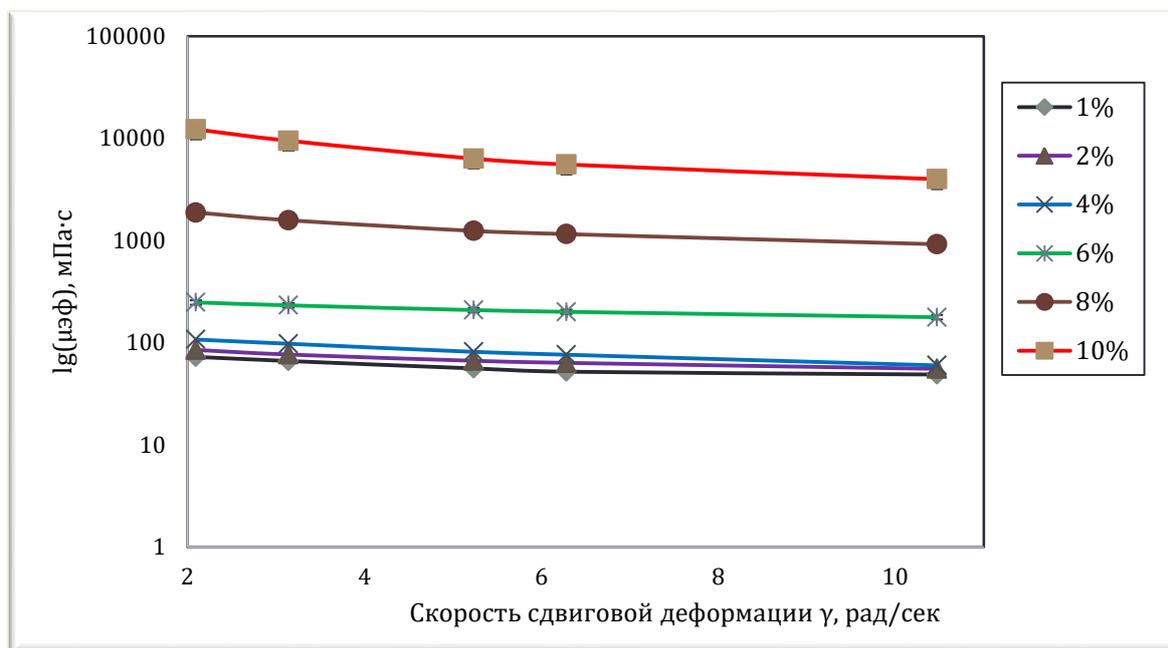


Рисунок 3 – Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига  
Figure 3. Dependency of effective viscosity on shear rate

При добавлении 10 мас% измельченных водорослей к комбикормовой массе характерен переход к структурообразованию неньютоновской жидкости в диапазоне скорости сдвига  $\dot{\gamma} \approx 3$  рад/сек. Укрепляющий эффект при внесении измельченных водорослей объясняется образованием межмолекулярных водородных связей при взаимодействии белков клейковины кормовой массы и полисахаридов водорослей.

Исходя из требований к компонентному составу комбикормовой продукции [3], наибольший

практический интерес представляет масса с концентрацией водорослей от 1 до 4%. Данное соотношение взято исходя из условий сбалансированного по микроэлементному составу бурых водорослей. Для данного диапазона зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига характеризуется более пологой, прямолинейной зависимостью, описывающей вязкость псевдопластичной жидкости. На рисунке 3 представлена зависимость  $lg\mu_{эф}(\dot{\gamma})$  для комбикормовой массы с добавлением измельченных водорослей в различных соотношениях.

Для определения влияния величины концентрации измельченных водорослей на параметры Бингамовской реологической модели провели статистический анализ коэффициентов линейной аппроксимации экспериментальных данных (рисунок 4) по аналогии с таблицей.

Результаты показали зависимость только предельного напряжения сдвига вязкопластичного материала от концентрации измельченных водорослей. Для определения этой зависимости был проведен регрессионный анализ влияния избыточного давления на предел текучести, результаты которого представлены в виде линейной регрессионной зависимости.

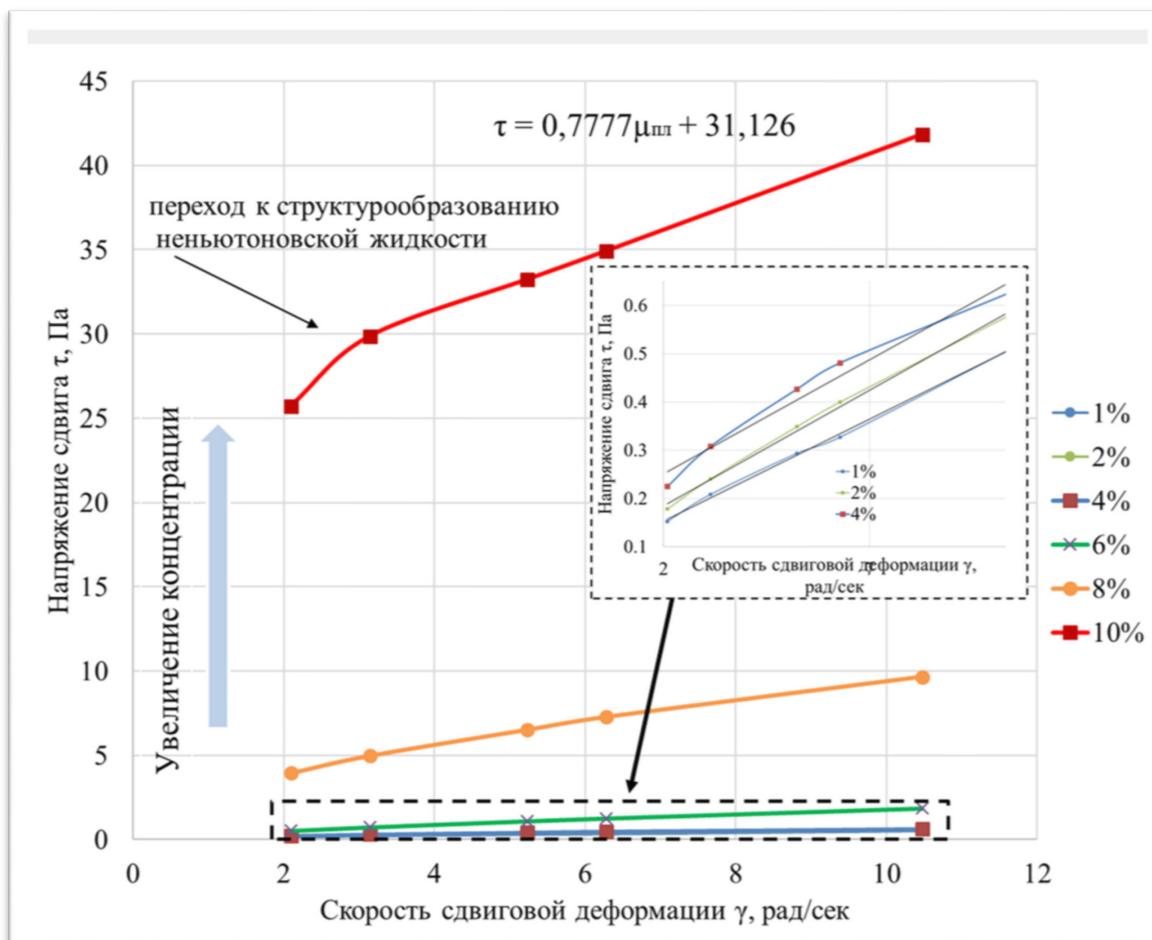


Рисунок 4 – Анализ коэффициентов линейной аппроксимации экспериментальных данных  
 Figure 4. Analysis of the linear approximation coefficients for the experimental data

В результате статического анализа было выявлено, что предельное напряжение сдвига линейно изменяется в зависимости от концентрации измельченных водорослей. Аппроксимация уравнения течения в рамках бингамовской реологической модели с учетом установленного влияния концентрации измельченных водорослей может быть представлена следующей зависимостью

$$\tau(\dot{\gamma}, C_{\text{вод}}) = (0,0299 \cdot C_{\text{вод}} + 0,0035Pa) + (0,047 \cdot Pa \cdot s)\dot{\gamma}$$

и позволяет идентифицировать течение пластического слоя как водяной прослойки на границе поршневого течения комбикормовой массы в канале экструдера.

## Заключение

Изучаемая комбикормовая смесь с добавлением измельченных водорослей является псевдопластичной и может быть описана с помощью Бингамовской реологии. Количество добавки водорослей влияет на процессы структурообразования. Установлено, что предел текучести комбикормовой массы линейно изменяется в зависимости от величины концентрации измельченной массы водорослей, а полученная зависимость  $\tau(\dot{\gamma}, C_{\text{вод}})$  позволяет идентифицировать течение пластического слоя как пленки воды на границе поршневого течения комбикормовой массы. Таким образом, полученные параметры реологической модели Бингама позволяют прогнозировать реологию вязкопластичного течения комбикормовой массы с добавлением измельченных водорослей в широком диапазоне скоростей сдвига в каналах экструдера. Полученные реологические свойства псевдопластичной комбикормовой смеси (вязкость и вязкоупругость) с практической стороны вопроса важны в зоне транспортировки материала и в зоне формирования экструдата (в матрице экструдера) для расчета технических параметров экструдера.

## Литература

1. Дьяченко А., Дубровская Т., Леута И. Обоснование возможности реализации высокодоходного бизнеса на рынке комбикормов в России // АПК: Экономика, управление. 2017. № 10. С. 63–73.
2. Alizamir S., de Véricourt F., Sun P. Efficient feed-in-tariff policies for renewable energy technologies. *Operations Research*. 2016, V. 64, no. 1, pp. 52–66.
3. Ghadiryanfar M., Rosentrater K.A., Keyhani A., Omid M. A review of macroalgae production, with potential applications in biofuels and bioenergy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. V. 54, pp. 473–481.
4. Макаринская А., Егоров Б., Батиевская Н., Бордун Т. Морские водоросли в производстве комбикормов // Комбикорма. 2015. № 6. С. 70–73.
5. Chia S.R., Ong H.C., Chew K.W., Show P.L., Phang S.M., Ling T.C., Chang J.S. Sustainable approaches for algae utilization in bioenergy production. *Renewable Energy*. 2018, V. 129, pp. 838–852.
6. Escapa C., Coimbra, R. N., Paniagua, S., García, A. I., & Otero, M. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. 2015, V. 185, pp. 276–284.
7. Sun Y., Liao Q., Huang Y., Xia A., Fu Q., Zhu X., Li J. Application of growth-phase based light-feeding strategies to simultaneously enhance *Chlorella vulgaris* growth and lipid accumulation. *Bioresource Technology*. 2018, V. 256, pp. 421–430.
8. Шевцов А.А., Шенцова Е.С., Дранников А.В., Травина Е.Ю., Козлов В.Г., Пономарев А.В. Способ приготовления комбикорма для сельскохозяйственной птицы: пат. 2320198 С1 Российская Федерация. 2008. Бюл. № 9. 6 с.
9. Перебейнос А.В., Воронова Е.А., Кушнир Е.И., Романенко Р.В. Использование методов математического моделирования в технологии новых кормовых продуктов // Научные труды Дальрыбвтуза. 2010. № 22. С. 348–354.
10. Santos M.O., Martins M.A., Coimbra J.S.R., Gates R.S., Corrêdo L.P. Rheological behavior of *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. cultures in different biomass concentrations. *Engenharia Agricola*. 2013. V. 33, no. 5, pp. 1063–1071.
11. Dai L., Bergfreund J., Reichert C.L., Fischer P., Weiss J. Shear rheological properties of acid hydrolyzed insoluble proteins from *Chlorella protothecoides* at the oil-water interface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, V. 551, pp. 297–304.
12. Wu Z., Shi X. Rheological properties of *Chlorella pyrenoidosa* culture grown heterotrophically in a fermentor. *Journal of Applied Phycology*. 2008, V. 20, no. 3, pp. 279–282.
13. Inglett G.E., Chen D., Liu C.X., Lee S. Pasting and rheological properties of oat products dry-blended with ground chia seeds. *LWT-Food Science and Technology*. 2014, V. 55, no. 1, pp. 148–156.
14. Foffano G., Lintuvuori J., Morozov A., Stratford K., Cates M.E., Marenduzzo D. Bulk rheology and microrheology of active fluids. *The European Physical Journal E*. 2012, V. 35, no. 10, pp. 9775–9787.
15. Гукасян А.В. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Шорсткий И.А. Исследование реологии масличного материала при экструзионной обработке // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2018. № 1. С. 83–87.
16. Косачев В.С., Гукасян А.В. Реологическая модель течения масличного материала в экструдере // Актуальные направления научных исследований: перспективы развития: сб. тр. Чебоксары: Интерактив плюс, 2017. С. 193–195.
17. Cagney N. Effects of cell motility and morphology on the rheology of algae suspensions. *Journal of Applied Phycology*. 2017, V. 29, no. 3, pp. 1145–1157.

## References

1. Dyachenko A., Dubrovskaya T., Leuta I. Justification of a possibility of realization of highly profitable business in the market of compound feeds in Russia. *Agroindustrial Complex: Economics, Management*. 2017, no. 10, pp. 63–73. (In Russian)
2. Alizamir S., de Véricourt F., Sun P. Efficient feed-in-tariff policies for renewable energy technologies. *Operations Research*. 2016, V. 64, no. 1, pp. 52–66.
3. Ghadiryanfar M., Rosentrater K.A., Keyhani A., Omid M. A review of macroalgae production, with potential applications in biofuels and bioenergy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, V. 54, pp. 473–481.
4. Makarinskaya A., Egorov B., Batievskaya N., Bordun T. Marine algae in the production of mixed feeds. *Combicorma*. 2015, no. 6, pp. 70–73. (In Russian)
5. Chia S.R., Ong H.C., Chew K.W., Show P.L., Phang S.M., Ling T.C., Chang J.S. Sustainable approaches for algae utilization in bioenergy production. *Renewable Energy*. 2018, V. 129, pp. 838–852.
6. Escapa C., Coimbra, R. N., Paniagua, S., García, A. I., & Otero, M. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. 2015, V. 185, pp. 276–284.
7. Sun Y., Liao Q., Huang Y., Xia A., Fu Q., Zhu X., Li J. Application of growth-phase based light-feeding strategies to simultaneously enhance *Chlorella vulgaris* growth and lipid accumulation. *Bioresource Technology*. 2018, V. 256, pp. 421–430.
8. Shevtsov A.A., Shentsova E.S., Drannikov A.V., Travina E.Ju., Kozlov V.G., Ponomarev A.V. *Method for preparing of mixed feed for farm birds*. Patent RF, no. 2320198 C1. 2008.
9. Perebeinos A.V., Voronova E.A., Kushnir E.I., Romanenko R.V. The use of mathematical modeling methods in the technology of new feed products. *Scientific Works of Dalrybvtuz*. 2010, no. 22, pp. 348–354. (In Russian)
10. Santos M.O., Martins M.A., Coimbra J.S.R., Gates R.S., Corrêdo L.P. Rheological behavior of *Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp. cultures in different biomass concentrations. *Engenharia Agrícola*. 2013, V. 33, no. 5, pp. 1063–1071.
11. Dai L., Bergfreund J., Reichert C.L., Fischer P., Weiss J. Shear rheological properties of acid hydrolyzed insoluble proteins from *Chlorella protothecoides* at the oil-water interface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, V. 551, pp. 297–304.
12. Wu Z., Shi X. Rheological properties of *Chlorella pyrenoidosa* culture grown heterotrophically in a fermentor. *Journal of Applied Phycology*. 2008, V. 20, no. 3, pp. 279–282.
13. Inglett G.E., Chen D., Liu C.X., Lee S. Pasting and rheological properties of oat products dry-blended with ground chia seeds. *LWT-Food Science and Technology*. 2014, V. 55, no. 1, pp. 148–156.
14. Foffano G., Lintuvuori J., Morozov A., Stratford K., Cates M.E., Marenduzzo D. Bulk rheology and microrheology of active fluids. *The European Physical Journal E*. 2012, V. 35, no. 10, pp. 9775–9787.
15. Gukasyan A.V., Koshevoy E.P., Kosachev V.S., Shorstky I.A. Study of oilseed material rheology during extrusion processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Pishchevaya tekhnologiya*. 2018, no. 1, pp. 83–87. (In Russian)
16. Kosachev V.S., Gukasyan A.V. Rheological model of the flow of oilseed material in an extruder. Current directions of scientific research: prospects for development. Proceedings of the Conference Title. *Cheboksary, Interactiv plus Publ.*, 2017. pp. 193–195. (In Russian)
17. Cagney N. Effects of cell motility and morphology on the rheology of algae suspensions. *Journal of Applied Phycology*. 2017, V. 29, no. 3, pp. 1145–1157.

## Информация об авторах

Иван Вадимович Евтишин – магистрант

Иван Александрович Шорсткий – канд. техн. наук, доцент Кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения

## Information about the authors

Ivan V. Evtishin, Graduate student

Ivan A. Shorstkii, Ph. D., Associate Professor of the Department of Technological Equipment and Life-Support Systems

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

Статья поступила в редакцию 27.01.2021

Одобрена после рецензирования 11.05.2021

Принята к публикации 18.05.2021

The article was submitted 27.01.2021

Approved after reviewing 11.05.2021

Accepted for publication 18.05.2021