

УДК 628.355

**О. В. Нестер, Р. М. Маркевич, И. А. Гребенчикова**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СОХРАНЯЕМОСТИ ГРАНУЛ АКТИВНОГО ИЛА, ПОЛУЧЕННЫХ В АЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ**

Гранулы активного ила получены инкубированием в аэробных условиях активного ила, отобранного на очистных сооружениях молочного производства, на сточных водах данного производства. Изучена динамика снятия загрязнений (по показателю ХПК) в сточных водах молочного производства свежесформированными гранулами в сравнении с флокулированным активным илом. Показано, что скорость очистки гранулированным илом в 2,1 раза выше, тогда как объемная доза гранулированного ила в 2 раза меньше, чем флокулированного. Установлено, что при температуре  $(4 \pm 1)^\circ\text{C}$  в фосфатном буферном растворе, физиологическом растворе или в водопроводной воде гранулы сохраняли размер и механическую прочность на протяжении 4 месяцев. Изучена динамика снятия ХПК для сточных вод молочного производства гранулами после хранения в сравнении с флокулированным активным илом. Отмечено, что в условиях высокой нагрузки по загрязнениям (значение ХПК сточных вод  $4200 \text{ мг/дм}^3$ ) гранулированный активный ил более устойчив, скорость очистки им в 2,0–2,7 раза превышает скорость удаления загрязнений флокулированным илом. Показано, что значение илового индекса флокулированного ила в 1,3–1,4 раза выше, чем гранулированного.

**Ключевые слова:** активный ил, сточные воды, инкубирование, гранула, буферный раствор, физиологический раствор, стабильность, химическая потребность в кислороде, доза ила.

**O. V. Nester, R. M. Markevich, I. A. Grebenchikova**  
Belarusian State Technological University

### **DEFINITION OF TERMS PERSISTENCE OF GRANULES OF THE ACTIVATED SLUDGE, OBTAINED UNDER AEROBIC CONDITIONS**

Activated sludge granules are obtained by incubation in aerobic conditions of activated sludge, selected at the treatment facilities of dairy production, at the wastewater of this production. The dynamics of pollution removal (in terms of COD) in the waste water of dairy production by freshly formed granules in comparison with flocculated activated sludge was studied. It is shown that the purification rate of granulated sludge is 2.1 times higher, while the volume dose of granulated sludge is 2 times less than that of flocculated sludge. It was found that at a temperature of  $(4 \pm 1)^\circ\text{C}$  in a mixture with phosphate buffer solution, saline or tap water granules retained size and mechanical strength for 4 months. Dynamics of removal of COD for waste water of milk production by granules after storage in comparison with flocculated activated sludge is studied. It is noted that in conditions of high pollution load (the value of wastewater COD  $4200 \text{ mg/dm}^3$ ) granular activated sludge is more stable, the speed of purification of granular sludge is 2.0–2.7 times higher than the rate of removal of pollution by flocculated sludge. It is shown that when the volume fraction of granular activated sludge is 2 times higher than the volume fraction of flocculated sludge, the mass dose of granular sludge is 2.7 times higher than that of flocculated sludge. It has been shown that the sludge index of flocculated sludge is 1.3–1.4 times higher than that of granular sludge.

**Key words:** activated sludge, waste water, incubation, granule, buffer solution, saline solution, stability, chemical oxygen demand, sludge dose.

**Введение.** Многолетняя практика показала, что как с технико-экономической, так и с экологической точки зрения биологической очистке коммунальных и многих производственных сточных вод не существует альтернативы.

Вместе с тем существенным недостатком аэробной очистки сточных вод является образование большого количества избыточного ила, необходимость его удаления и переработки. Проблема усугубляется тем, при массовом развитее нитчатых бактерий (вспухании ила)

ухудшаются его седиментационные свойства, увеличивается время отстаивания, наблюдается вынос флокул из вторичных отстойников.

Скорость седиментации и фильтруемость активного ила значительно возрастают после обработки традиционными и инновационными реагентными препаратами, однако это требует дополнительных эксплуатационных затрат [1].

В этой связи усилия исследователей должны быть сосредоточены на изучении характеристик микробных агрегатов, влияющих на их

водоотдающую способность; состава биоценоза, условий синтеза и структуры внеклеточных полимерных веществ, влияния состава питательной среды на агрегацию микроорганизмов, механизмов образования флокул, биопленок, гранул, факторов, обеспечивающих их стабильность, в том числе при хранении [2].

В частности, использование гранулированного ила в аэробных условиях характеризуется незначительным приростом, он обладает хорошими седиментационными и фильтрационными свойствами. Кроме того, гранулы активного ила хорошо переносят режим «голодания», что актуально для периодических производств с неравномерной подачей стоков. Поскольку гранулы представляют собой «биореакторы» с аэробной зоной очистки на поверхности и анаэробным ядром в них, то одновременно осуществляются разные процессы (нитрификация, денитрификация, автотрофное окисление аммонийного азота). Агломерированный в гранулы активный ил устойчив к повышенным нагрузкам по загрязнителям и токсикантам [3].

Ранее нами в лабораторных условиях для получения гранулированного активного ила в аэробных условиях использовался активный ил городских очистных сооружений, а в качестве субстрата применялись городские сточные воды и сточные воды молочного производства. В процессе гранулообразования наблюдались изменения в численном и видовом составе биоценоза активного ила. Отмечено, что численность раковинных амеб, составлявшая в исходном активном иле около 80%, существенно сократилась, возросла доля кругоресничных инфузорий. В активном иле, инкубируемом на сточных водах молочного производства, гранулы были обнаружены на 70-е сут, их размер составил от 1,5 до 4,0 мм. В пробах на городских сточных водах гранулы начали формироваться на 80-е сут, их размер не превышал 1,5 мм [4].

Значительно быстрее образуются гранулы при использовании в качестве исходного активного ила очистных сооружений молочного производства. Инкубирование адаптированного к сточным водам данного производства активного ила привело к формированию первых образований уже спустя 30 сут от начала эксперимента. При этом получены более крупные и плотные гранулы в сравнении с агрегатами, образованными из ила городских очистных сооружений [5].

Таким образом, для формирования гранул активного ила в аэробных условия важное значение имеет как исходный состав активного ила, так и среда, которая используется в качестве субстрата.

Цель настоящего исследования заключалась в определении условий сохранимости гранул, полученных при аэрации.

**Основная часть.** Объектами исследования послужили иловая суспензия и осветленные сточные воды очистных сооружений молочного производства. Исходный активный ил характеризовался достаточно бедным биоценозом, в нем преобладали бактериальные зооглейные скопления (рис. 1). Сточные воды, отобранные и использованные на разных стадиях эксперимента, имели значение ХПК от 1820 до 4200 мг/дм<sup>3</sup>.

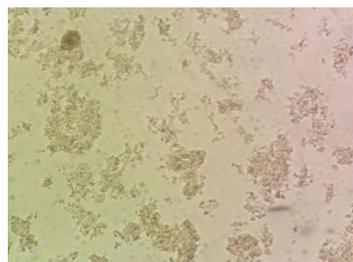


Рис. 1. Активный ил очистных сооружений молочного производства (40×)

Для получения гранул активного ила смешивали по 30 см<sup>3</sup> иловой суспензии и 70 см<sup>3</sup> сточных вод, устанавливали значение pH в интервале 6,5–7,5. Грануляцию осуществляли на шейкере-инкубаторе в конических колбах объемом 250 см<sup>3</sup> при частоте вращения 150 мин<sup>-1</sup> и температуре 25°C. Использовали подобранный ранее отъемно-доливной режим подпитки иловой смеси (1 раз в 5 сут) [5].

При пересеве содержимое конической колбы количественно переносили в мерный цилиндр, смесь отстаивали в течение 7 мин, сливали 70 см<sup>3</sup> надосадочной жидкости и доводили уровень до рабочего (100 см<sup>3</sup>) исходными сточными водами.

Первые образования наблюдали уже спустя 10 сут, однако они имели рыхлую структуру и небольшие размеры (1,0–1,5 мм). Спустя 30 сут были получены прочные гранулы размером от 2 до 3,5 мм (рис. 2, а).

В ходе дальнейшего инкубирования в режиме «голод – подпитка» отмечено уменьшение размеров и некоторая потеря прочности гранул. Таким образом, возникла необходимость подбора условий для сохранности полученных гранул.

Для оценки эффективности очистки сточных вод гранулированным активным илом изучили динамику снятия загрязнений (по показателю ХПК) в сточных водах молочного производства в сравнении с флокулированным активным илом (рис. 3). В осветленные сточные воды добавляли гранулированный и флокулированный (циркуляционный) активный ил в количестве 15 и 30 % об. соответственно.

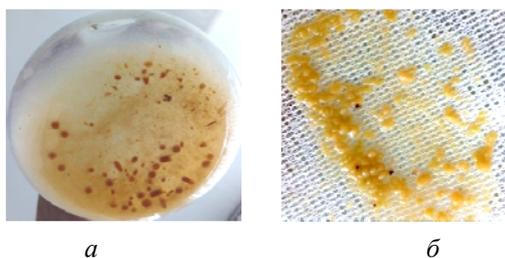


Рис. 2. Гранулы активного ила, полученные в аэробных условиях:  
а – в иловой суспензии; б – на фильтре

Иловые суспензии инкубировали на шейкере-инкубаторе в конических колбах объемом 250 см<sup>3</sup> при частоте вращения 150 мин<sup>-1</sup> и температуре 25°C, отбирая пробы через каждый час (рис. 3).

Через 2 ч инкубирования значение ХПК в пробе с гранулированным илом уменьшилось на 89%, с флокулированным – на 42%. Во втором варианте значение ХПК через 24 ч составило 220 мг/дм<sup>3</sup>.

По окончании эксперимента иловую суспензию, содержащую гранулы, отфильтровали на тканевом фильтре с размером ячеек 1 мм (рис. 2, б), промыли гранулы водопроводной водой, разделили на три части и количественно перенесли в емкости для хранения.

Были выбраны три варианта хранения гранул: фосфатный буферный раствор, физиологический раствор и водопроводная вода. Отобранные в емкости гранулы активного ила залили исследуемыми растворами в соотношении 1 : 5. Емкости подбирали таким образом, чтобы 1/3 объема занимал воздух. Образцы поместили в холодильник с температурой (4 ± 1)°С, длительность хранения составила 4 мес. В процессе хранения проводили визуальный контроль состояния гранул, периодически подвергали их механическому встряхиванию для проверки на устойчивость.

По истечении времени хранения незначительно уменьшился объем гранул в двух образцах, вероятно, в результате смыва с поверхности сорбированной взвеси (таблица). Видимых признаков разрушения или повреждения гранул не обнаружено.

Представляла интерес оценка эффективности очистки сточных вод гранулами активного ила после хранения. Динамику снятия ХПК изучали аналогично вышеописанному. Сточные воды имели исходное значение ХПК 4200 мг/дм<sup>3</sup>, доза гранулированного и флокулированного активного ила составляла 5 и 10 % об. соответственно (рис. 4, а), затем была уменьшена в 2 раза (рис. 4, б).

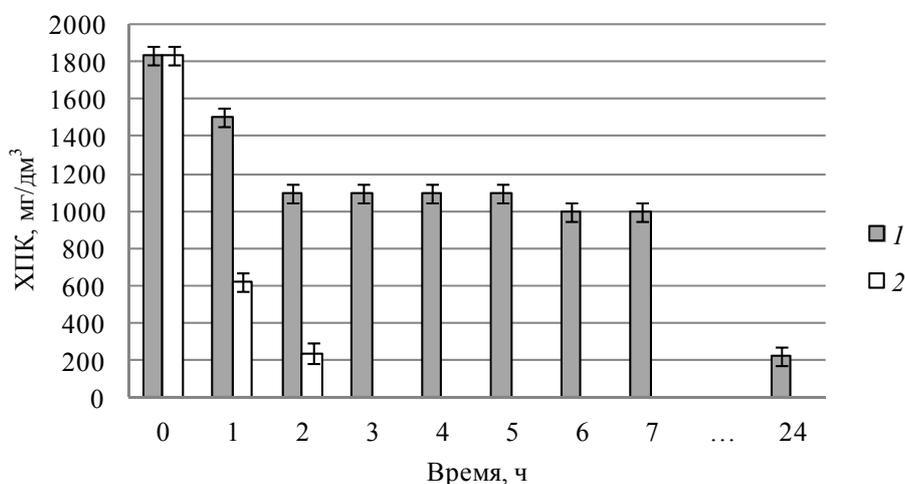


Рис. 3. Снятие загрязнений свежесформированными гранулами и флокулированным активным илом:  
1 – флокулированный активный ил; 2 – гранулы активного ила

#### Условия и результаты хранения гранул активного ила

Номер образца	Условия хранения	Объем гранул, см <sup>3</sup>		Механическая устойчивость гранул после хранения
		исходный	после хранения	
1	Фосфатный буферный раствор (рН 6,88)	1,7 ± 0,1	1,6 ± 0,1	Без видимых изменений
2	Физиологический раствор (0,85 %)	1,7 ± 0,1	1,7 ± 0,1	>>
3	Водопроводная вода	1,7 ± 0,1	1,6 ± 0,1	>>

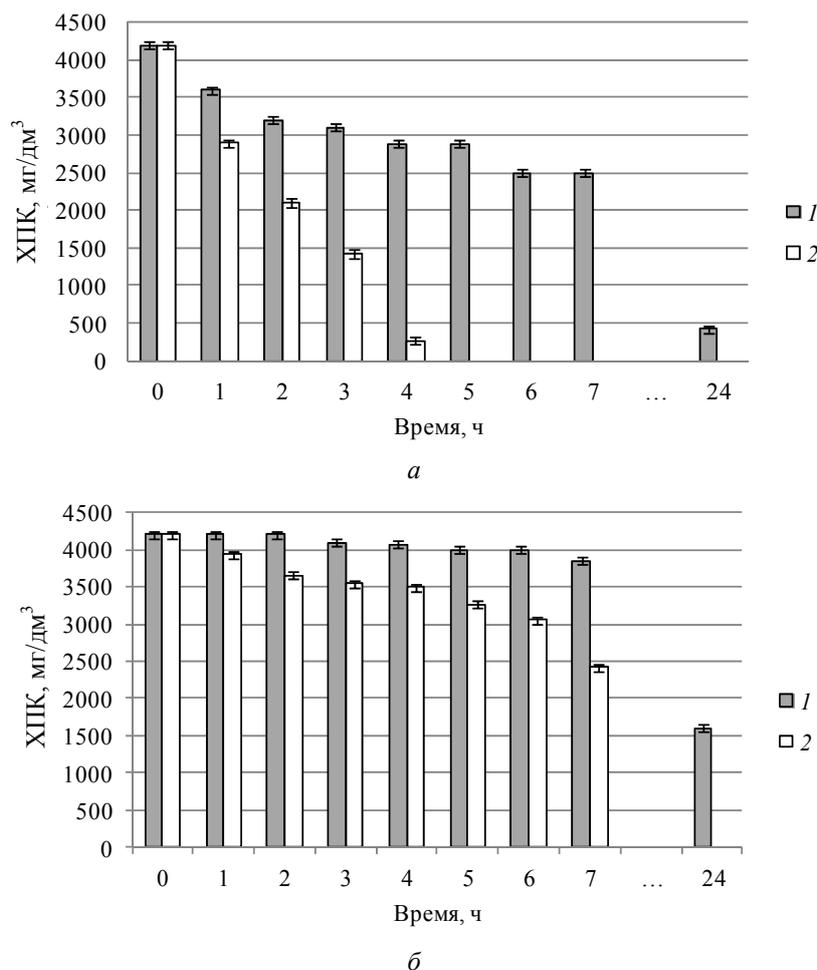


Рис. 4. Снятие загрязнений гранулами после хранения и флокулированным активным илом:  
1 – флокулированный активный ил; 2 – гранулы активного ила

В варианте с гранулированным активным илом степень удаления ХПК через 4 ч инкубирования составила 90%, тогда как для флокулированного активного ила – 33%. Уменьшение дозы ила замедлило процесс очистки, спустя 7 сут инкубирования значение ХПК уменьшилось на 43 и 21% для гранулированного и флокулированного ила соответственно. Однако и в данном случае после 24 ч инкубирования в варианте с гранулированным илом значение ХПК было менее 10 мг/дм<sup>3</sup>, в то время как для флокулированного ила этот показатель составлял 1600 мг/дм<sup>3</sup>.

По окончании эксперимента иловые суспензии подвергли вакуум-фильтрованию, полученные осадки высушили при температуре 105°C до постоянной массы и рассчитали дозу ила по сухому веществу.

В суспензии гранулированного ила она составила 4 г/дм<sup>3</sup>, в суспензии флокулированного ила – 3 г/дм<sup>3</sup>.

**Заключение.** В результате инкубирования в аэробных условиях активного ила, отобранного на очистных сооружениях молочного производ-

ства, в течение 30 сут были сформированы прочные гранулы размером от 2,0 до 3,5 мм.

Полученные гранулы характеризуются высокой способностью к удалению загрязнений из высокозагрязненных сточных вод молочного производства.

Установлено, что при температуре (4 ± 1)°C в фосфатном буферном растворе, физиологическом растворе или в водопроводной воде гранулы сохранили размер, механическую прочность и высокую способность к очистке сточных вод на протяжении 4 месяцев.

Отмечено, что в условиях высокой нагрузки по загрязнениям (значение ХПК сточных вод составляет 4200 мг/дм<sup>3</sup>) гранулированный активный ил более устойчив, скорость очистки гранулированным илом выше: за 4 ч инкубирования гранулированным активным илом удалено 90% загрязнений по ХПК, в то время как флокулированным – 33%.

При этом объемная доза гранулированного ила в 2 раза меньше, чем флокулированного. Установлено, что значение илового индекса флокулированного ила в 1,3–1,4 раза выше, чем гранулированного.

### Литература

1. Характеристика активного ила в технологиях совместной биологической и реагентной очистки сточных вод и утилизации осадков / Л. М. Сибиева [и др.] // Вода: химия и экология. 2017. № 7 (109). С. 31–36.
2. Сироткин А. С., Шагинурова Г. И., Ипполитов К. Г. Агрегация микроорганизмов: флокулы, биоплёнки, микробные гранулы: монография. Казань: «Фэн» АН РТ, 2007. 160 с.
3. Dobbeleers T., Daens D., Miele S., D'aes J., Caluwé M., Geuens L., Dries J. Performance of aerobic nitrite granules treating an anaerobic pre-treated wastewater originating from the potato industry // *Bioresour. Technol.* 2017. P. 211–219.
4. Нестер О. В., Маркевич Р. М. Формирование гранул активного ила в аэробных условиях аэрации. Труды БГТУ. 2016. № 4: Химия, технология органических веществ и биотехнология. С. 220–224.
5. Нестер О. В., Маркевич Р. М. Гранулирование в условиях аэрации активного ила, сформированного на очистных сооружениях города и молочного производства // Биотехнология: взгляд в будущее: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Ставрополь, 2018. С. 247–250.

### References

1. Sibiyeva L. M., Yezhkova D. V., Sirotkin A. S., Vdovina T. V. Characteristics of activated sludge technology combines biological and chemical wastewater and sludge utilization. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology], 2017, no 7 (109), pp. 31–36 (In Russian).
2. Sirotkin A. S., Shaginurova G. I., Ippolitov K. G. *Agregatsiya mikroorganizmov: flokuly, bioplenki, mikrobnyye granuly* [Aggregation of microorganisms: floccules, biofilms, microbial granules]. Kazan, "Fen" AN RT Publ., 2007. 160 p.
3. Dobbeleers T., Daens D., Miele S., D'aes J., Caluwé M., Geuens L., Dries J. Performance of aerobic nitrite granules treating an anaerobic pre-treated wastewater originating from the potato industry. *Bioresour. Technol.*, 2017, pp. 211–219.
4. Nester O. V., Markevich R. M. The formation of granules of the activated sludge in the aeration aerodigestive. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 4: Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology, pp. 220–224 (In Russian).
5. Nester O. V., Markevich R. M. Granulation in conditions of aeration of activated sludge generated in wastewater treatment plants of the city and of milk production. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Biotekhnologiya: vzglyad v budushcheye"* [Materials of the IV International scientific and practical conference "Biotechnology: looking to the future"]. Stavropol, 2018, pp. 247–250 (In Russian).

### Информация об авторах

**Нестер Ольга Владимировна** – инженер кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nester80@yandex.ru

**Маркевич Раиса Михайловна** – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: marami@tut.by

**Гребенчикова Ирина Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gre@tut.by

### Information about the authors

**Nester Olga Vladimirovna** – engineer, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nester80@yandex.ru

**Markevich Raisa Mikhailovna** – PhD (Chemistry), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marami@tut.by

**Grebenchikova Irina Aleksandrovna** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Biotechnology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gre@tut.by

Поступила 10.09.2019