

УДК 628.355

**О. В. Нестер, Р. М. Маркевич**

Белорусский государственный технологический университет

**ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНУЛ АКТИВНОГО ИЛА В АЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ**

В лабораторных условиях прослежена динамика формирования гранул при инкубировании активного ила в условиях аэрации на городских сточных водах и сточных водах молочного производства. Подготовленную иловую смесь инкубировали на шейкере Enviromental Shaker-Incubator ES-20 при рабочей частоте 140 об/мин. Значение pH поддерживалось в пределах 6,8–8,5, температура – 20, 25 и 30°C. Выбран отъемно-доливной режим инкубирования, обеспечивающий чередование нагрузки по загрязнению и голоданию активного ила. С целью отбора наиболее крупных и компактных хлопьев и удержания формирующихся гранул время осаждения активного ила перед очередной подпиткой составляло 7 мин.

На основании распределения микроорганизмов по основным индикаторным группам отмечен невысокий уровень развития исходного активного ила, до 80% микроорганизмов в нем составляли раковинные амёбы. Прослежены изменения в численном и видовом составе биоценоза активного ила в процессе гранулообразования. Отмечено существенное сокращение численности раковинных амёб и возрастание доли кругоресничных инфузорий (до 34% при инкубировании на городских сточных водах и до 61% – на сточных водах молочного производства). Подбран режим подпитки: 1 раз в 4 сут для городских сточных вод и 1 раз в 10 сут для сточных вод молочного производства, что обеспечило большую стабильность объема активного ила после отстаивания. Отмечена разница в седиментационных характеристиках ила, инкубируемого при разных температурах: с увеличением температуры инкубирования возрастает скорость осаждения ила и уменьшается конечный объем активного ила после 7-минутного отстаивания. 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.

**Ключевые слова:** активный ил, формирование гранул, сточные воды, инкубирование, режим подпитки, температура, индикаторная группа микроорганизмов, седиментация.

**O. V. Nester, R. M. Markevich**

Belarusian State Technological University

**THE FORMATION OF GRANULES  
OF THE ACTIVATED SLUDGE IN AEROBIC CONDITIONS**

The dynamics of granules formation after incubation of activated sludge with aeration in urban wastewater and wastewater of dairy production was monitored in laboratory. The prepared sludge mixture was incubated on Enviromental Shaker-Incubator ES-20 with the operating frequency of 140 rpm. The pH value was maintained in the range of 6.8–8.5, at temperature 20, 25 and 30°C. The detachable-filling up the mode of incubation that provided alternation of load and of sludge starvation was selected. For the purpose of selecting the largest and the most compact flakes and preservation of formed granules, the sedimentation time of activated sludge between feedings was 7 min.

Based on the distribution of microorganisms by the main indicator groups, low level of development of the original activated sludge was noted. Up to 80% of microorganisms in the activated sludge were testate amoebae. Changes in number and species composition of activated sludge biocenosis in the process of granules formation were tracked. Significant decrease in the number of testate amoebae and obvious increase in proportion of peritrichous ciliates (up to 34% after incubation in municipal wastewater and up to 61% in wastewater of dairy production) was observed. The selected recharge mode was chosen: 1 time per every 4 days for municipal wastewater and 1 time per 10 days for wastewater of dairy production. This provided greater stability of the activated sludge volume after settling. The difference in sludge sedimentation characteristics, after incubation at different temperatures was marked. With the increase in temperature of incubation, the rate of silt deposition increased and the final volume of sludge after a 7-minute settling reduced. In activated sludge incubated in wastewater of dairy production the granules were found after 70 days, and their size ranged from 1.5 to 4.0 mm. In samples with urban wastewater, the granules formation started on the 80<sup>th</sup> day, and their size did not exceed 1.5 mm.

**Key words:** activated sludge, formation of granules, wastewater, incubation, feeding mode, temperature, indicator microorganisms, sedimentation.

**Введение.** Очистка сточных вод – одна из важнейших задач экологического характера. Она приобретает все большую актуальность в связи с ростом численности населения, развитием промышленности и сельского хозяйства, а также истощением пригодных к использованию водных ресурсов. Очистка была бы невозможна без участия микроорганизмов, в противном случае процесс химического превращения соединений, содержащихся в загрязненной воде, происходил бы в течение длительного времени.

Процесс очистки осуществляет сложное сообщество микроорганизмов – активный ил. Активный ил включает представителей различных систематических групп: бактерий, простейших, колероваток, червей, в меньшем количестве – грибов и водорослей. Внешне активный ил представляет собой коричневые хлопья размером до сотен микрометров; при этом он состоит примерно на 70% из живых организмов и на 30% из частиц неорганической природы. Основную долю среди живых микроорганизмов составляют флокулообразующие бактерии, массовая доля которых в биоценозе активного ила доходит до 90% [1].

В процессе биологической аэробной очистки сточных вод происходит высокий прирост биомассы и образование большого количества избыточного активного ила, что является существенным недостатком, так как обезвоживание избыточного активного ила требует высоких энергетических затрат, а его депонирование наносит ущерб окружающей среде. Одним из решений этой проблемы является применение гранулированного активного ила.

Гранулированный активный ил от обычного (флокулированного) отличается плотностью и размерами частиц, скоростью оседания. Использование гранулированного ила приводит к минимальному образованию избыточной биомассы; повышается устойчивость к нагрузкам по загрязнению и токсикантам; обеспечивается возможность использования более высоких нагрузок на единицу объема сооружения; улучшаются седиментационные свойства активного ила и его фильтрационные свойства при обезвоживании; наблюдается уменьшение вспухаемости и пенообразования в аэротенке [2].

Факторы, влияющие на образование гранул активного ила в аэробных условиях, имеют различный характер:

- биологический – одновременное присутствие в биоценозе активного ила нитчатых бактерий и флокулообразователей;
- физико-химический – гидродинамическая обстановка (гидродинамический стресс), состав сточных вод (ХПК до 7000 мг/дм<sup>3</sup>, рН в пределах 7,0–8,5), экстремально короткое

время осаждения, обязательное голодание после нагрузки.

Гидродинамический стресс, вызываемый срезающими силами потоков жидкости и воздуха при интенсивной аэрации, способствует гранулированию хлопьев активного ила, так как происходит активное продуцирование внеклеточных полимеров, играющих важную роль в гранулировании [1].

Цель работы заключалась в подборе условий и изучении факторов, влияющих на формирование гранул активного ила в аэробных условиях при использовании в качестве субстрата городских сточных вод и сточных вод молочного производства.

**Основная часть.** Объектами исследования являлись активный ил (рис. 1), сточные воды городских очистных сооружений и сточные воды молочного производства. Уровень загрязненности сточных вод городских очистных сооружений по ХПК составлял 450–600 мг/дм<sup>3</sup>, сточных вод молочного производства – 3500–5000 мг/дм<sup>3</sup>.

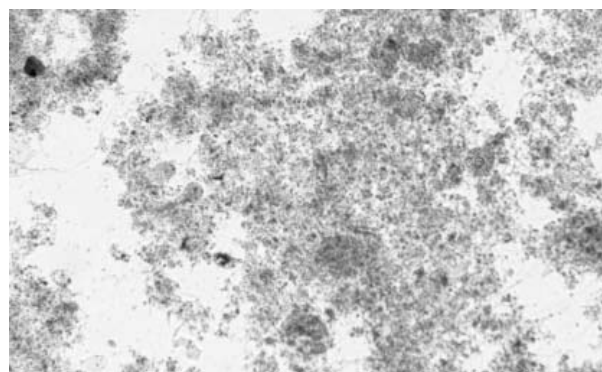


Рис. 1. Исходный активный ил (10×)

Исходную иловую смесь готовили следующим образом: активный ил переносили в мерный цилиндр, отстаивали в течение 7 мин, сливали 60–70 мл надосадочной жидкости, довели объем смеси до рабочего объема (100 мл) порцией городских сточных вод либо сточных вод молочного производства, переносили в коническую колбу объемом 250 мл.

С целью формирования гранул аэробного активного ила иловую смесь инкубировали на шейкере Enviromental Shaker-Incubator ES-20 при рабочей частоте 140 об/мин. Значение рН поддерживалось в пределах 6,8–8,5, температура – 20, 25 и 30°C. Выбран отъемно-доливной режим инкубирования. Для каждого вида сточных вод и каждого значения температуры инкубирование проводили в 3 колбах.

После каждого этапа инкубирования отстаивание иловой смеси проводили аналогично описанному выше, активный ил подпитывали свежей порцией сточных вод, а в надосадочной

жидкости устанавливали конечное значение ХПК и pH.

В ходе эксперимента конечное значение pH городских сточных вод колебалось в пределах 6,8–7,7, величина ХПК составляла 50–100 мг/дм<sup>3</sup>. Для сточных вод молочного производства эти показатели находились в пределах 6,0–7,0 и 250–400 мг/дм<sup>3</sup> соответственно.

С целью наблюдения за процессом гранулообразования проводили микроскопирование ила. Распределение микроорганизмов по основным индикаторным группам в исходном активном иле представлено на рис. 2. Следует отметить невысокий уровень развития данного активного ила, подавляющую долю (до 80%) микроорганизмов в нем составляли раковинные амёбы.

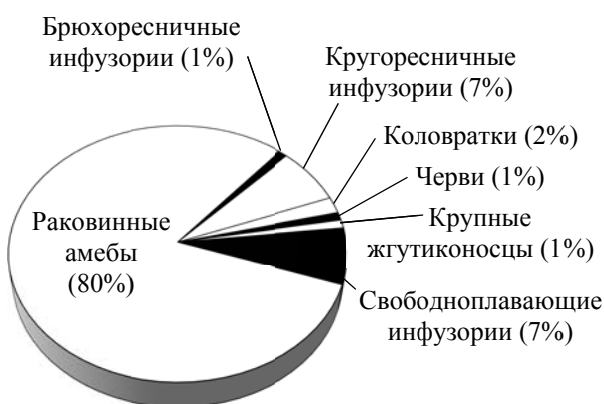


Рис. 2. Распределение микроорганизмов по индикаторным группам в исходном активном иле

В процессе гранулообразования при микроскопировании наблюдали изменения в численном и видовом составе по основным индикаторным группам микроорганизмов. Спустя 14 сут инкубирования иловой смеси существенно сократилась численность раковинных амёб, а доля кругоресничных инфузорий возросла до 34% при инкубировании на городских сточных водах и до 61% – на сточных водах молочного производства (рис. 3). Меньше стало свободноплавающих инфузорий, отмечено исчезновение малощетинковых червей, разрыхляющих формирующиеся гранулы.

Через 30 сут от начала инкубирования с определением состава биоценоза активного ила возникли затруднения, так как большинство микроорганизмов сосредоточилось на поверхности образующихся гранул, они заслонялись гранулами, и подсчет их стал не возможным.

В начале инкубирования активного ила был выбран режим питания 1 раз в 4 сут. Однако, как видно из рис. 4, объем активного ила, инкубируемого на городских сточных водах, стал резко снижаться вследствие недостатка питательных веществ. В то же время активный

ил на сточных водах молочного производства интенсивно прирастал из-за высокого содержания питательных веществ.

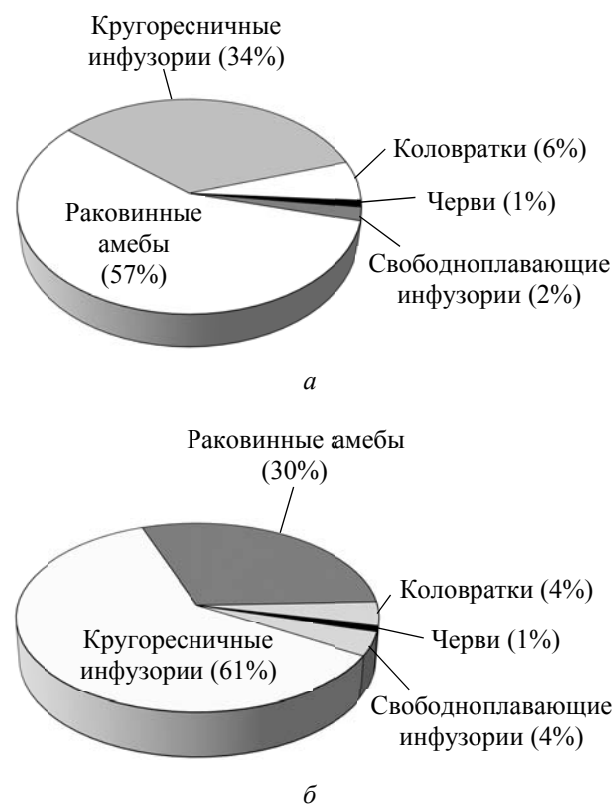


Рис. 3. Распределение микроорганизмов по индикаторным группам в активном иле через 14 сут инкубирования:  
а – инкубирование на городских сточных водах;  
б – инкубирование на сточных водах молочного производства

На 42 сут инкубирования был изменен режим подпитки: свежие порции городских сточных вод добавляли 1 раз в 4 сут; сточных вод молочного производства – 1 раз в 10 сут. Такой график питания позволил обеспечить большую стабильность объема активного ила (рис. 4).

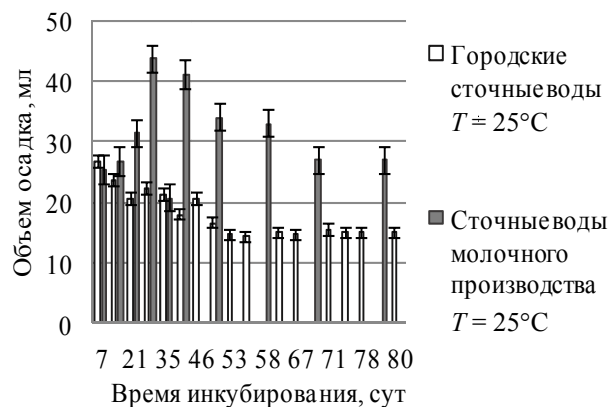
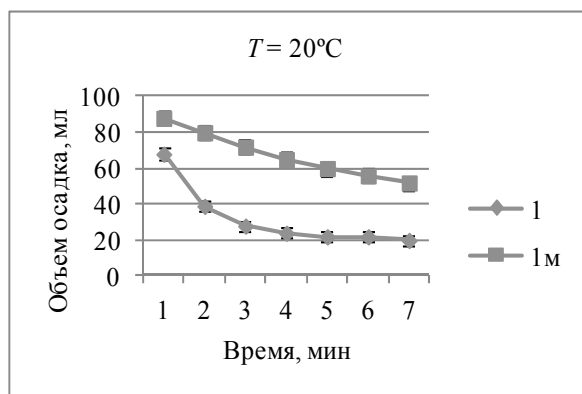
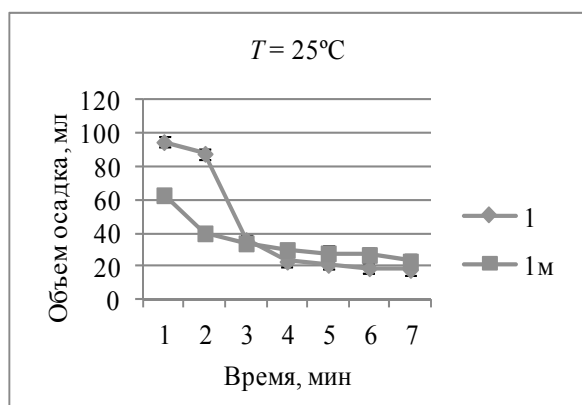


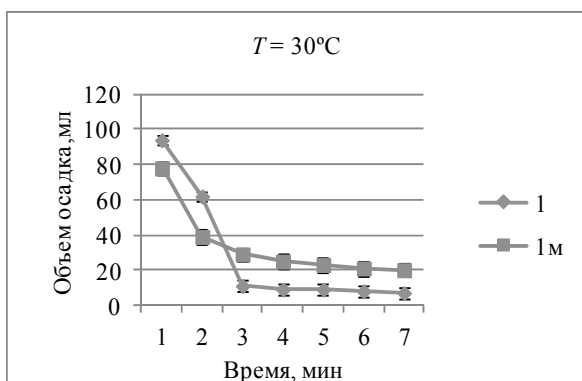
Рис. 4. Изменение объема ила в процессе инкубирования (время отстаивания 7 мин)



а



б



в

Рис. 5. Динамика оседания активного ила за 7 минут отстаивания: а – инкубирование при  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ; б – инкубирование при  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ; в – инкубирование при  $T = 30^{\circ}\text{C}$ ; 1 – объем активного ила, инкубируемого на городских сточных водах; 1м – объем активного ила, инкубируемого на сточных водах молочного производства

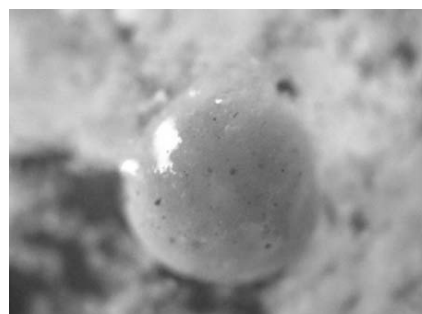
Отмечена разница в седиментационных характеристиках ила, инкубируемого при разных температурах.

Скорость оседания ила возрастает с увеличением температуры инкубирования: изменение объема ила, инкубируемого при температурах 25 и 30°C (рис. 5, б, в) происходит в первые 3–4 мин оседания, практически достигая

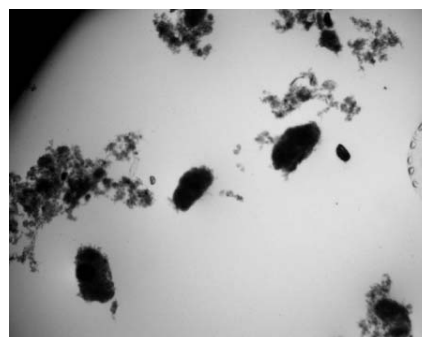
к этому времени своего конечного значения; оседание ила, инкубируемого при температуре 20°C (рис. 5, а), происходит более плавно, с меньшей скоростью.

Аналогичная зависимость прослеживается для конечного объема активного ила: через 7 мин отстаивания активный ил, инкубируемый при температурах 25 и 30°C, занимает объем 20 мл и менее (для городских сточных вод), тогда как при температуре инкубирования 20°C конечный объем активного ила, инкубируемого на сточных водах молочного производства, после 7-минутного отстаивания значительно больше – около 50 мл.

Более благоприятными оказались температуры инкубирования 25 и 30°C и для формирования гранул. В активном иле, инкубируемом при данных температурах на сточных водах молочного производства, первые гранулы были обнаружены на 70-е сут, а в пробах на городских сточных водах гранулы начали формироваться на 80-е сут (рис. 6). В активном иле, инкубируемом при 20°C, к 30-м сут инкубирования отмечалось уплотнение флоккул, хорошее их оседание, прозрачная надильовая вода. Однако в дальнейшем наблюдалось разрыхление флоккул, их распад на более мелкие. Типичные гранулы ни в одной из проб при 20°C не сформировались.



а



б

Рис. 6. Гранулы аэробного активного ила (10×): а – активный ил, инкубируемый на сточных водах молочного производства; б – активный ил, инкубируемый на городских сточных водах

Размер гранул, полученных на сточных водах молочного производства, составил от 1,5 до 4,0 мм. Гранулы, сформированные на городских сточных водах, мельче, их размер не превышал 1,5 мм.

**Заключение.** В лабораторных условиях прослежена динамика формирования гранул при инкубировании активного ила в условиях аэрации на городских сточных водах и сточных водах молочного производства.

Прослежены изменения в численном и видовом составе биоценоза активного ила в процессе гранулообразования. Отмечено существенное сокращение численности раковинных амёб, уменьшение количества свободноплавающих инфузорий, исчезновение малоцетинковых червей, разрыхляющих формирующиеся гранулы. Доля кругоресничных инфузорий возросла до 34% при инкубировании активного ила на городских сточных водах и до 61% – на сточных водах молочного производства.

Установлено влияние нагрузки по загрязнению на формирование гранул. При уменьшении нагрузки ниже критического значения

вследствие эндогенного окисления резко снижается доза (и объем) ила. Высокое содержание питательных веществ способствует приросту биомассы, но не образованию гранул. Подобран оптимальный режим подпитки: 1 раз в 4 сут для городских сточных вод и 1 раз в 10 сут для сточных вод молочного производства.

Отмечена разница в седиментационных характеристиках ила, инкубируемого при разных температурах: с увеличением температуры инкубирования возрастает скорость осаждения ила и уменьшается конечный объем активного ила после 7-минутного отстаивания.

В активном иле, инкубируемом при температурах 25 и 30°C на сточных водах молочного производства, первые гранулы были обнаружены на 70-е сут, их размер составил от 1,5 до 4,0 мм. В пробах на городских сточных водах при таких же температурных режимах гранулы начали формироваться на 80-е сут, их размер не превышал 1,5 мм. В пробах, инкубируемых при 20°C, как на городских сточных водах, так и на сточных водах молочного производства типичные гранулы не сформировались.

### Литература

1. Сироткин А. С., Шагинурова Г. И., Ипполитов К. Г. Агрегация микроорганизмов: флоккулы, биопленки, микробные гранулы: монография. Казань: «Фэн» АН РТ, 2007. 106 с.
2. Акментина А. В. Исследование гранулированного активного ила для очистки коммунальных сточных вод // Водные ресурсы и водопользование. 2011. № 10. С. 35–38.

### References

1. Sirotkin A. S., Shaginurova G. I., Ippolitov K. G. *Agregatsia mikroorganizmov: flokuly, bioplyonki, mikrobye granuly: monographiya* [Aggregation of microorganisms: floccules, biofilms, microbic granules. Monography] Kazan, "Fan" AN RT, 2007. 106 p.
2. Akmentina A. V. A study of granulated active sludge for purification of municipal wastewater. *Vodnyye resursy i vodopol'zovaniye* [Water resources and water use], 2011, no. 10, pp. 35–38 (In Russian).

### Информация об авторах

**Нестер Ольга Владимировна** – инженер кафедры биотехнологии и биоэкологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nester@belstu.by

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

### Information about the authors

**Nester Olga Vladimirovna** – engineer, Department of Biotechnology and Bioecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nester@belstu.by

**Markevich Raisa Mikhaylovna** – PhD (Chemistry), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Biotechnology and Bioecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Markevich@belstu.by

Поступила 20.02.2016