

Аэробная **БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА** СТОЧНЫХ вод в УСЛОВИЯХ ГРАНУЛООБРАЗОВАНИЯ АКТИВНОГО ИЛА.

I. Гранулообразование активного ила при очистке модельных стоков

Исследовалось гранулообразование аэробного активного ила в условиях очистки модельных стоков в отъемно-доливном режиме. Гранулы ила образуются в наибольшем количестве и с наибольшей скоростью при создании селективных условий для гранулирующих микроорганизмов, в отсутствие лимитирования растворенного кислорода в среде, при уровне ХПК в сточной воде от 400 до 5000 мг/л, в диапазоне pH 7–8,5. Показано, что пассирование активного ила к сублетальным дозам пероксида водорода способствует гранулообразованию и стабилизации новообразованных гранул.

Введение

Один из путей совершенствования аэробной биологической очистки сточных вод связан с управлением качеством активного ила (АИ) с целью поддержания его высокой окислительной способности, уменьшения вспухаемости и пенообразования в аэротенках, улучшения седиментационных свойств во вторичном отстойнике, адгезии ила при очистке на биофильтрах и в биотенках и, напротив, снижения адгезионных, адсорбционных свойств при очистке, например, в мембранных биореакторах, для которых проблема загрязнения АИ и, как следствие, снижение проницаемости мембран является приоритетной [1, 2]. В этой связи определенный интерес могут представлять возможности формирования в очищаемой среде гранулированного ила. Получение стабильных микрогранул ила при непрерывной аэрации среды и отсутствии лимитирования процесса биологической очистки поступлением кислорода внутрь таких микрогранул позволило бы существенно по-

А.Е. Кузнецов*,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель заведующего кафедрой биотехнологии, ФГБОУ ВПО
Российский химико-технологический университет им.
Д.И. Менделеева
Д.В. Колотилин,
научный сотрудник лаборатории №19,
ООО Научно-исследовательский институт эластомерных материалов и изделий («НИИЭМИ»)

высить производительность аэробных реакторов с минимальным выносом взвешенных веществ из реакторов и вторичных отстойников, обеспечить повышение качества очистки и хорошие фильтрационные свойства ила при его обезвоживании.

Гранулированный ил самообразуется в аэробных реакторах современных конструкций (USBR — Upflow Sequence Bioreactor, EGSBR — Expanded Granular Sludge Bed Reactor) [3, 4]. Гранулообразование возможно с участием относительно медленно растущих микроорганизмов при нитрификации, окислении сульфидов, при определенном гидродинамическом режиме. Гранулы ила размером 1–5 мм могут образовываться и в аэробных непроточных и в проточных условиях при окислении органических веществ. Гранулы ила образуются при работе SB-реактора с попеременным чередованием аэрации, осаждения ила, слива части осветленной воды, добавлении новой порции исходной воды и без механического перемешивания, разрушающего новообразующиеся гранулы [5–9]. Аэробные гранулы намного полнее удаляют загрязнения воды, выдерживают изменение нагрузки [6], практически не образуют избыточной биомассы [8]. Однако гранулы, образованные в SBR (Sequencing Batch Reactor), как правило, нестабильны и распадаются через 2–3 месяца с момента новообразования.

Имеются некоторые данные о возможности образования гранул аэробного ила в проточных условиях [11]. Гранулы образуются в режиме восходящего потока, аналогичном используемому в реакторе со взвешенным слоем загрузки с фиксированной био пленкой. В таких постоянно строго аэробных условиях стабильный гранулированный ил, как и в SBR, не удается получить [6, 11]. Нестабильные аэробные микробные гранулы распадаются по неизвестным пока при-

*Адрес для корреспонденции: ae-kuz@yandex.ru

чинам [6-10], время их существования может составлять от недели до трех месяцев, и ясно, что на стабильность аэробных гранул влияет множество неучтенных факторов, роль которых необходимо выявить.

Таким образом, крайне интересным представляется выяснение условий образования и поддержания стабильности гранул ила на основе аэробных ассоциаций микроорганизмов. Если бы удалось найти и обеспечить условия формирования гранул АИ в аэробном и непрерывном проточном режиме, то можно было бы существенно улучшить показатели работы аэробных биореакторов. В этой связи целью наших исследований было выяснение условий формирования гранул аэробного ила, их влияния на формирование и стабильность гранул и качество очистки.

Материалы и методы исследования

Исходный АИ

Использовались:

1) АИ №1, отобранный из очистных сооружений Вороновского завода по переработке солода (ВЗПС, пос. Вороново, Московская обл.); активность ила постоянно поддерживалась путем пересевов на стоки ВЗПС или модельный сток и аэрирования ила со стоком в колбах на качалке;

2) АИ №2, полученный смешением образцов ила, отобранных из городской канализационной системы, эвтрофицированного и неэвтрофицированного прудов, речного ила, АИ аэротенка городских очистных сооружений; активность ила постоянно поддерживалась путем пересевов на модельный сток и аэрирования ила со стоком в колбах на качалке.

Модельные стоки

Использовались:

1) Модельный сток пивоварения (сток №1), приготовленный разбавлением пива «Балтика 0», ХПК 1000 мг/л.

2) Сток переработки сои (сток №2), полученный из соевого лепестка экстракцией этанолом для извлечения углеводов. Этанол из полученного экстракта отгонялся. Полученная после отгонки этанола меласса разбавлялась в 20 раз и подвергалась аэробной ферментации с использованием дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* раса XII. Полученная после ферментации суспензия фуговалась для отделения дрожжей.

Н.С. Хохлачев, аспирант, ФГБОУ ВПО Российский химико-технологический университет им. Д.И.

Менделеева

С.В. Калёнов, кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии, ФГБОУ ВПО Российский химико-технологический университет им. Д.И.

Менделеева

О.С. Занина, студентка, ФГБОУ ВПО Российский химико-технологический университет им. Д.И.

Менделеева

Надосадочная жидкость представляла собой сток с ХПК 10000–15000, рН 4,0–5,0.

3) Модельный хозяйственно-бытовой сток (сток №3), полученный смешением отвара водных вытяжек из отмеренных количеств продуктов питания с ХПК 400 ± 50 мгО₂/л, PO₄³⁻ 5 ± 1 мг/л, N_{общ.} 25 ± 3 мг/л, рН $8 \pm 0,5$.

4) Сток лабораторного UASB-реактора (сток №4), на вход которого подавался модельный сток №1 на основе пива «Балтика 0». Характеристика стока №4 приведена в табл. 1.

Методика пересева образцов АИ

Формирование гранул аэробного ила изучалось в периодических условиях с циклическим режимом очистки подобно тому, как это осуществляется в SB-реакторах.

Аэробный ил культивировали при аэрации на шейкере при 180–200 об/мин в конических колбах объемом 250 мл при рабочем объеме иловой взвеси 100 мл при температуре 20–25 °С, рН 6,8–8,5. Объем исходного посевного материала, представляющего отстоявшийся осадок хлопьев ила, составлял 30 мл. Для поддержания активности ила пересевы проводились, как правило, 1 раз в 4–7 сут. В ходе пересева содержащую ил среду переносили в мерный цилиндр, отстаивали в течение 5–10 мин., затем сливали 60–70 мл надосадочной жидкости. Осевший ил заливали новой порцией сточной воды до объема 100 мл, переносили обратно в коническую колбу и ставили на шейкер.

В ходе культивирования определяли рН, концентрацию АИ, содержание ХПК бихроматным методом [12], морфологию хлопьев

Таблица 1

Характеристика модельного стока №4 после лабораторного UASB-реактора

Показатель	Значение
рН	6,2–6,5
ХПК, мг/л	2100–3000
NH ₄ ⁺ -N, мг/л	14–33
N _{общ.} , мг/л	110–150
P _{общ.} , мг/л	46–50
Углеводы (моносахара в пересчете на глюкозу), мг/л	200–250
Сухой остаток, мг/л	3500–4000

и новообразующихся гранул АИ под микроскопом с получением микрофотографий ила. В качестве характеристики гранул использовался диаметр гранул и их цвет.

При изучении влияния условий очистки на формирование и стабильность гранул и качество очистки проверялась, в том числе, возможность повышения степени очистки и стабильности гранул при внесении пероксида водорода в сточную воду. Ранее нами было показано, что внесение H_2O_2 в ферментационную среду или в сточную воду в определенных условиях может улучшить показатели ферментации и процесса биологической очистки [13–15]. Учитывая также, что в распаде гранул аэробного ила важную роль может играть дефицит кислорода во внутренних зонах гранул, можно было бы ожидать стабилизации размера гранул аэробного ила при внесении H_2O_2 , что увеличило бы продолжительность эффективной жизнедеятельности гранулообразующего консорциума.

Для изучения влияния H_2O_2 на очистку и гранулообразование путем последовательных пересевов (пассирования) вели контрольные линии АИ — без добавления и с добавлением H_2O_2 . В последнем случае через определенное количество пересевов получали АИ, более устойчивый к внесению пероксида, по сравнению с контрольным, непассированным илом. Пероксид водорода вносили в среду по ходу процесса в дозах 100–200 мг/л в виде 10 % H_2O_2 . Каждая линия поддерживалась в нескольких повторностях. Температура, аэрация, объем среды и колб, условия освещения во всех линиях были одинаковы. Другие компоненты вносили в зависимости от целей эксперимента.

Оборудование

Для аэрации использовались шейкеры Ш8 с термостатом Т8 (НПФ «Флоби», г. Москва), Heidolph Unimax 2010. В шейкере Ш8 перемешивание среды осуществляется за счет сложного орбитального движения платформы с колбами в горизонтальной и вертикальной плоскости. В шейкере Heidolph Unimax 2010 перемешивание среды осуществляется за счет орбитального движения платформы только в горизонтальной плоскости.

Значения рН измерялись рН-метром SevenCompact рН/Ion S220, Mettler Toledo. Морфология АИ изучалась с помощью оптического микроскопа Микромед-2 (вариант 2-20), 100x10 иммерсионный объектив.

Ключевые слова: активный ил, аэробные гранулы, биологическая очистка

Результаты и их обсуждение

Основные эксперименты проводили с модельным стоком №1 на основе пива «Балтика 0» при ведении 4-х линий АИ №1, исходно взятого из очистных сооружений ВЗПС:

Линия 1 — контрольная без добавления H_2O_2 .

Линия 2 — с добавлением 100 мг/л H_2O_2 .

Линия 3 — с добавлением 200 мг/л H_2O_2 .

Линия 4 — с добавлением 7,5 мг/л Mn^{2+} .

Уже после 2–3 циклов (пассирований) в колбах начали образовываться гранулы, которые постепенно увеличивались в размере по мере роста числа циклов очистки стока. Гранулы были способны образовываться при очистке модельного стока, стока солодовни и стока переработки сои.

На *рис. 1* приведена характеристика формирующихся гранул по мере пересева ила на новые порции модельного стока на основе пива «Балтика 0» при культивировании на шейкере Ш8.

Гранулы разделяются на три основные группы по цвету (*рис. 2*): черные, белые, бурые.

Черные гранулы новообразуются и доминируют в линиях ила №1, 2, 3.

Белые гранулы также новообразуются и впоследствии часть их трансформируется в гранулы черного цвета (*рис. 1, А, Б*).

Бурые гранулы, образующиеся в модельной среде на основе пива «Балтика 0», встречаются редко в виде крупных форм.

Наблюдения показали, что гранулы в своем развитии проходят ряд стадий, всего их было выделено 5.

1 стадия: в среде идет образование биомассы и АИ. Концентрация биомассы увеличивается.

2 стадия: свободная биомасса в среде агрегирует в белые или бурые хлопья ила (белые хлопья в среде на основе модельного стока пивоварения, бурые — в среде на основе стока переработки сои). Кроме того, часть ила адгезируется на стенках колб с образованием биопленки. Продолжительность стадии зависит (см. ниже) от уровня ХПК, степени аэрации, частоты обновления среды со сливом части надосадочной жидкости (при этом, очевидно, часть несфлуктурированного и неосевшего ила удаляется из среды) и составляет от 1 до 3 недель.

3 стадия: хлопья принимают округлую форму и уплотняются, образуя первые белые или бурые гранулы. Интенсивность зарастания стенок колбы снижается.

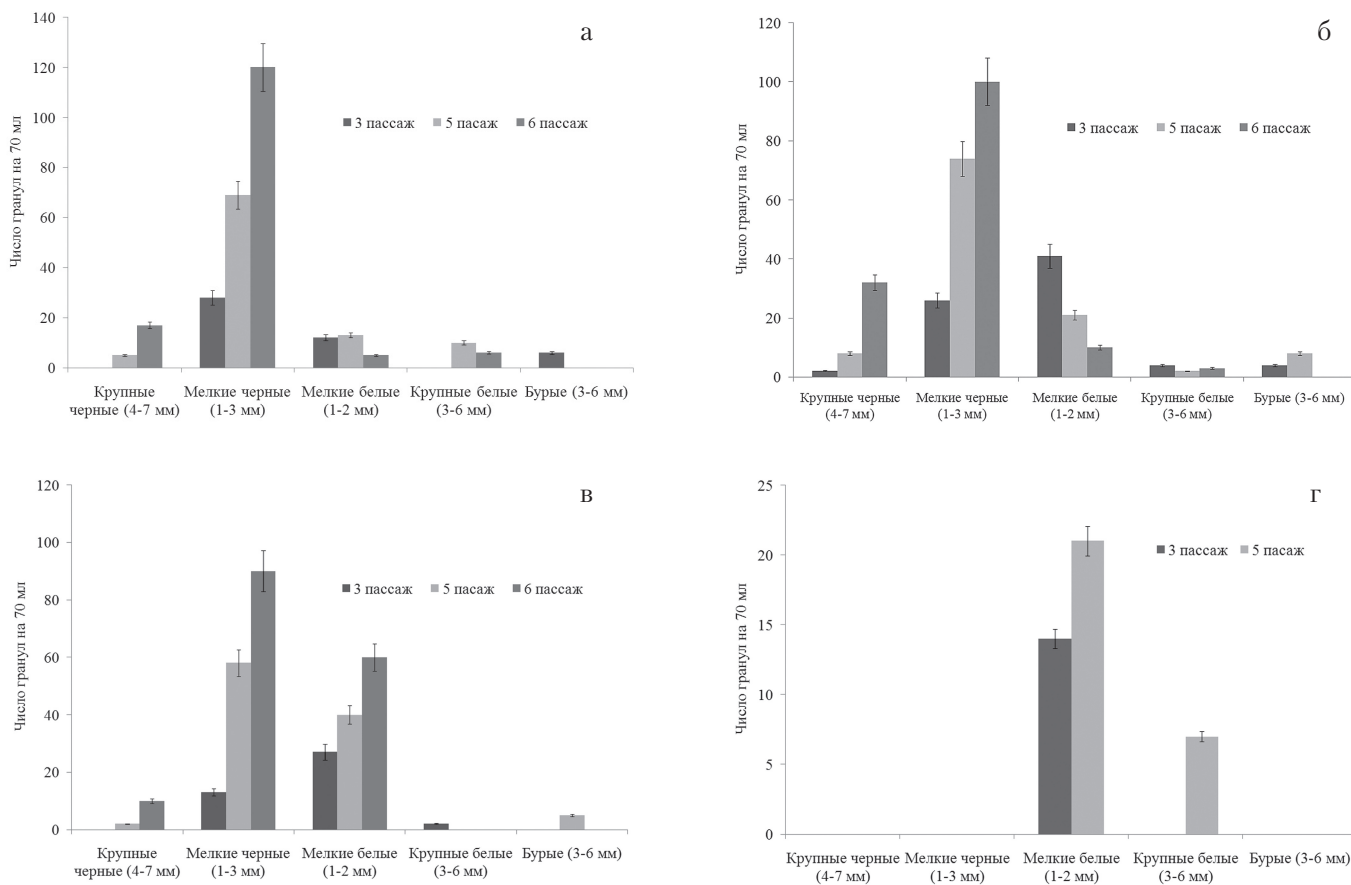


Рис. 1. Характеристика гранул ила, образующихся при пересеве АИ на модельный сток №1 на основе пива «Балтика 0» (представлены данные 3, 5, 6-го пассажей). А — контрольная линия без добавления H_2O_2 . Б — с добавлением 100 мг/л H_2O_2 . В — с добавлением 200 мг/л H_2O_2 . Г — с добавлением 7,5 мг/л Mn^{2+} .

4 стадия: белые гранулы укрупняются и равномерно чернеют.

5 стадия: начало распада крупных гранул на части. Начало этой стадии может спровоцировать резкое изменение ХПК среды, pH, степени аэрации и добавление ионов Mn^{2+} . В среднем, стадия наступает через 50–100 сут с момента образования первых гранул.

Цвет гранул зависит от условий, в которых существует гранула. Примечателен тот факт, что переходные формы в аэробных условиях встречаются крайне редко.

Микроскопирование препаратов микроорганизмов из гранул показало, что микроорганизмы, составляющие гранулы в различные периоды развития, различны. Гранулы на первой стадии развития образованы, большей частью, грибными культурами. Эти гранулы мало устойчивы и разрушаются в течение нескольких дней из-за лизиса содержимого во внутренней части гранул. Однако в ходе развития грибных гранул-колоний к

ним присоединяются и на них закрепляются бактериальные колонии. Таким образом, гранула — это реактор, в котором взаимодействуют гетеротрофные бактерии, грибные культуры и, вероятно, бактерии-нитрификаторы и денитрификаторы, что отчасти подтверждается посевами на агаризованные селективные среды.

На рис. 3 приведена характеристика формирующихся гранул ила сразу же после его пересева на сток переработки сои (сток №2). При пересеве использовался ил 10-го пассажа, выращенный на стоке №1. Использовались следующие варианты ведения линий ила:

Вариант 1: без добавления H_2O_2 , засевной ил контрольной линии, гранулы не вносятся.

Вариант 2: без добавления H_2O_2 , засевной ил контрольной линии, гранулы вносятся с засевным илом.

Вариант 3 — с добавлением 100 мг/л H_2O_2 , засевной ил линии, культивируемой с

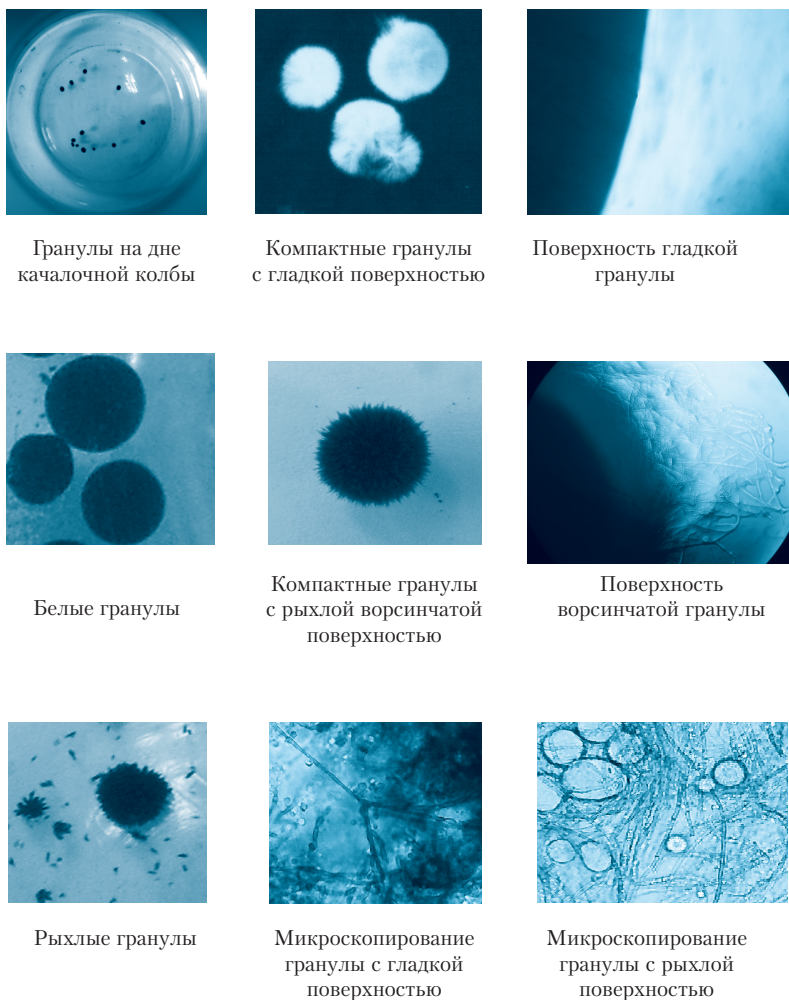


Рис. 2. Гранулы АИ, образующиеся при очистке стоков в периодических условиях отъемно-доливным методом с удерживанием ила седиментацией.

добавлением 100 мг/л H_2O_2 , гранулы вносятся с засевным илом.

Вариант 4 — с добавлением 200 мг/л H_2O_2 , засевной ил линии, культивируемой с добавлением 100 мг/л H_2O_2 , гранулы вносятся с засевным илом.

В опытах со стоком переработки сои гранулы белого цвета не встречаются; идет новообразование и развитие (увеличение в размере) во всех вариантах гранул черного и бурого цвета.

Таким образом, способность к новообразованию и росту гранул не зависит от вида стока, который, однако, влияет на морфологию и цвет формирующихся гранул. Возможно, что цвет гранул в какой-то степени обусловлен сорбцией красящих веществ, содержащихся в стоке, на гранулах ила.

В последующих экспериментах было изучено влияние условий очистки (культивирования) на размер, морфологию и стабильность гранул ила. Эксперименты проводились с использованием шейкера Ш8.

Влияние аэрации на грануляцию

Для установления влияния интенсивности аэрации на грануляцию ила в 3 конические колбы было залито 50, 100 и 150 мл среды (субстрат — сток №1, ХПК 1000 мг/л) и внесена суспензия засеваемого аэрировавшегося ила №1 с черными крупными гранулами с отношением суспензия засеваемого ила:новая среда как 1:5. Колбы были поставлены на шейкер. Через 2 недели в колбе с наименьшим объемом среды образовалось наибольшее число мелких новообразованных гранул; в колбе с объемом среды 100 мл численность гранул была меньше, а их размер больше. При наихудших условиях аэрации (объем среды 150 мл) численность гранул была наименьшей, их новообразование практически не происходило.

В другом эксперименте гранулы аэробного ила №1 поместили в 2 герметично закрытые конические колбы, каждая из которых содержала 50 мл стока на основе пива «Балтика 0». Через 3 сут окраска ила сменилась с черной на бурую, в среде и на поверхности гранул появились пузырьки газа. Через 5 сут структура всех гранул изменилась — их поверхность стала более рыхлой, вместе с тем наблюдалось и новообразование гранул. При последующем повторном аэрировании ила с бурыми гранулами последние вновь приобретали черный цвет.

Таким образом, гранулы достаточно устойчивы в условиях ограниченной аэрации или даже при ее отсутствии, но их морфология и фракционное соотношение в среде меняются. Высокий уровень аэрации способствует повышению скорости гранулообразования.

Влияние концентрации субстрата на грануляцию

В ходе эксперимента гранулы, полученные на модельной среде №1 с $XPK_{исх.} 1000$ мг/л, были внесены в ту же модельную среду, разбавленную водой до $XPK_{исх.} 400$ мг/л и помещены на качалку для аэрации. Через 3 сут гранулы в среднем стали крупнее. Их поверхность из гладкой стала более шероховатой, покрытой ворсинками. При более длительном пребывании в разбавленной среде

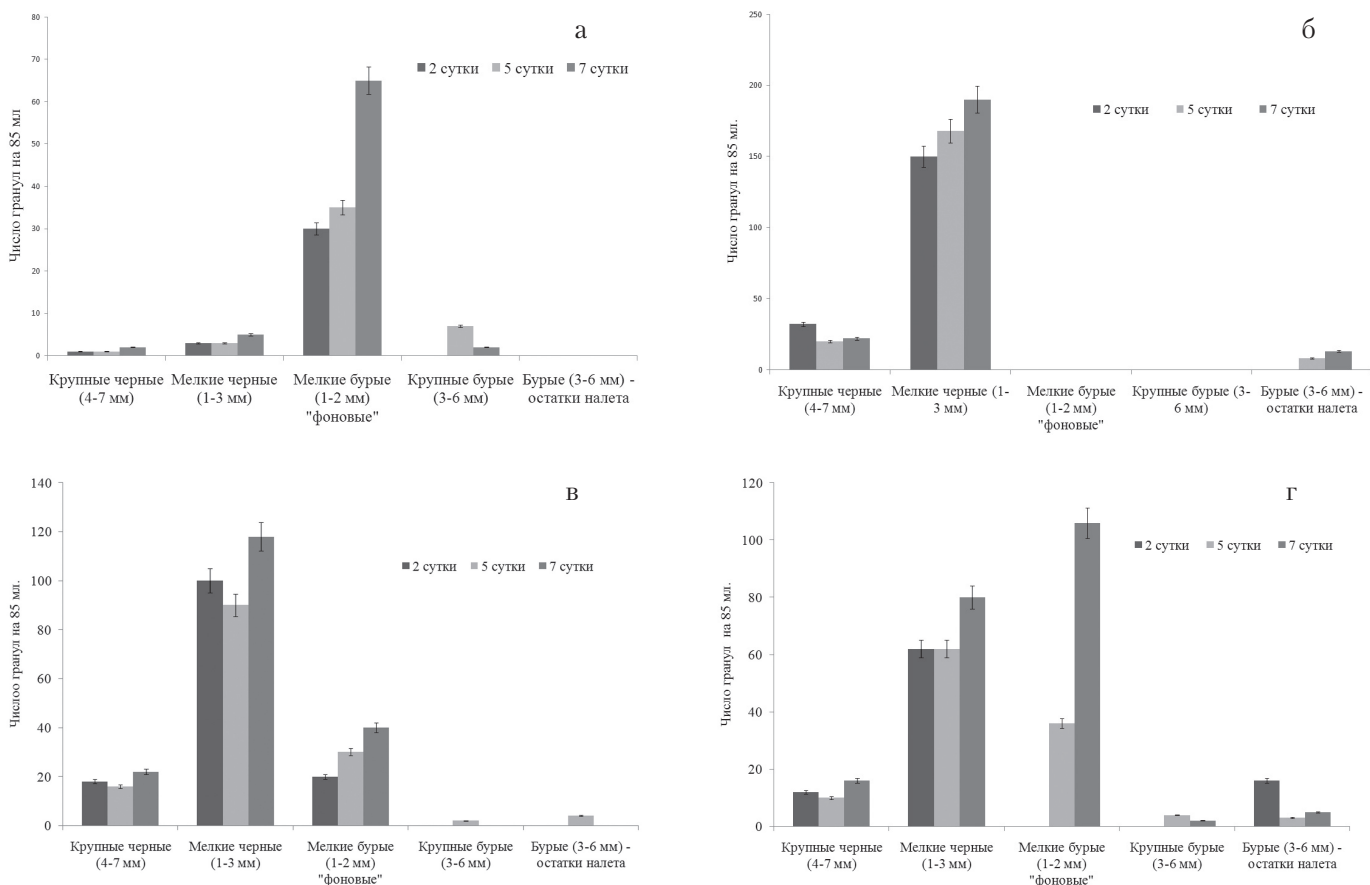


Рис. 3. Характеристика гранул ила, образующихся непосредственно после пересева АИ №1 10-го пассажира на сток №2 переработки сои.

А — без добавления H_2O_2 , засевной ил контрольной линии, гранулы не вносятся.

Б — без добавления H_2O_2 , засевной ил контрольной линии, гранулы вносятся с засевным илом.

В — с добавлением 100 мг/л H_2O_2 , засевной ил линии, культивируемой с добавлением 100 мг/л H_2O_2 , гранулы вносятся с засевным илом.

Г — с добавлением 200 мг/л H_2O_2 , засевной ил линии, культивируемой с добавлением 100 мг/л H_2O_2 , гранулы вносятся с засевным илом.

доля мелкой фракции гранул падала, и возрастало количество крупных черных гранул с размером 4–8 мм.

С повышением ХПК в среде новообразование гранул происходило быстрее. Гранулы увеличивались в размере при ХПК до 7000 мг/л. При более высоком ХПК новообразование гранул замедлялось.

При резком изменении концентрации субстрата в среде наблюдался распад части крупных, «старых» гранул.

Таким образом, аэробные гранулы хорошо переносят высокие концентрации загрязнений в среде (ХПК до 5000–7000 мг/л).

Влияние pH на грануляцию

В три колбы было внесено по 10 мл биомассы ила №1 с гранулами и по 20 мл среды. В первой колбе среда имела pH 8, во вто-

рой — 6, в третьей — 10. Через 3 сут в первой колбе pH составил до 7,8, во второй — 7,6, в третьей — 8,2. Гранулы в колбе №2 были наиболее крупными, в №1 и 3 наблюдалось некоторое измельчение и разрушение крупных гранул.

Таким образом, значения pH среды, не типичные для условий развития гранул, могут способствовать их разрушению. Микроскопирование микроорганизмов, входящих в состав гранул, показало, что в кислой области pH начинают развиваться грибы, на поверхности появляются филаменты, гранулы становятся рыхлыми. Можно предполагать, что для процесса гранулирования ила с хорошей способностью к осаждению оптимальным может являться нейтральное или слегка щелочное значение pH.

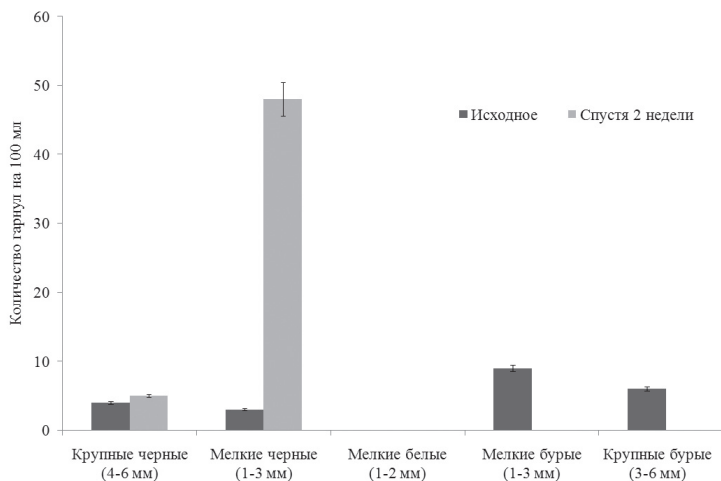


Рис. 4. Влияние негранулирующей (супендированной) биомассы ила на гранулообразование.

Влияние добавок нерастворимых компонентов на грануляцию

В две аэрируемые колбы внесли биомассу ила №1, не содержащую гранул. Первая колба — контрольная, во вторую добавлен мел как нерастворимая добавка, частицы которой могут служить центрами гранулообразования. Гранулообразование началось на третьей неделе после засева. Добавки мела на образование и рост гранул не повлияли.

Влияние Mn^{2+} и Fe^{3+} на грануляцию

В линию 4 ила №1 с добавлением 7,5 мг/л Mn^{2+} (рис. 1, г) в среду дополнительно добавлялось 10 мг/л Mn^{2+} (в виде $MnSO_4$). Линия, содержащая марганец, показала лучший прирост биомассы и хорошие показатели по снижению ХПК. Однако грануляция ила или не наблюдалась, или же шла медленно, сформировавшиеся гранулы разрушались.

Таким образом, добавление ионов марганца подавляет грануляцию.

Внесение 20 мг/л Fe^{3+} вызывало лишь почернение гранул без изменения прочих особенностей их образования и роста.

Влияние уровня негранулированной биомассы в среде на грануляцию ила

В аэрируемую колбу со 100 мл среды №1 без биомассы было добавлено небольшое количество гранул и повышенное количество биомассы ила №1, находящейся в среде в виде взвеси. Опыт продолжался в течение 5 недель после пересева.

В данном случае по мере ведения опыта также наблюдалось образование (рис. 4), преимущественно, черных гранул, одна-

ко последние начали формироваться только спустя 2 недели от начала эксперимента. Вместе с тем в среде поддерживалась высокая концентрация биомассы и скорость окисления загрязнений. Возможно, замедление гранулообразования было обусловлено присутствием в среде большого количества негранулирующих микроорганизмов, мешающих развиваться гранулирующим.

Таким образом, для начала образования гранул требуется некоторый критический уровень доли биомассы гранулообразующих микроорганизмов в среде. Для повышения их доли и увеличения скорости гранулообразования важно создание селективных условий, благоприятствующих удержанию гранулообразующей биомассы в реакторе. Наличие гранул в среде ускоряет процессы их новообразования.

Грануляция при обработке стока, прошедшего анаэробное сбраживание

Было изучено поведение использованного в экспериментах АИ №1 при обработке надильной жидкости, образовавшейся после анаэробного сбраживания в UASB-реакторе стока от переработки сои.

В первом варианте было взято 35 мл ила с гранулами после 10 минутного осаждения из 100 мл содержащей гранулы суспензии. Гранулы были распределены между двумя коническими колбами на 250 мл, залиты прошедшим анаэробный реактор стоком до уровня 100 мл и помещены на шейкер Ш8 для аэрации содержимого. В последующем через каждые 3–4 сут в те-

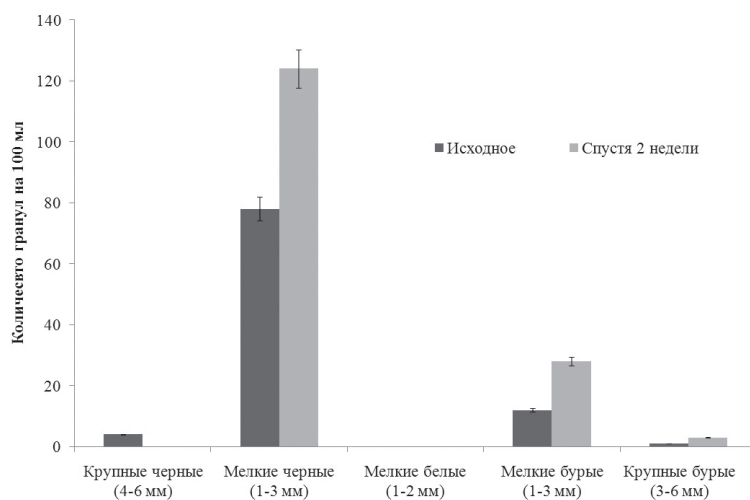


Рис. 5. Влияние надильной жидкости, образующейся после анаэробного сбраживания стока переработки сои, на формирование и устойчивость гранул.

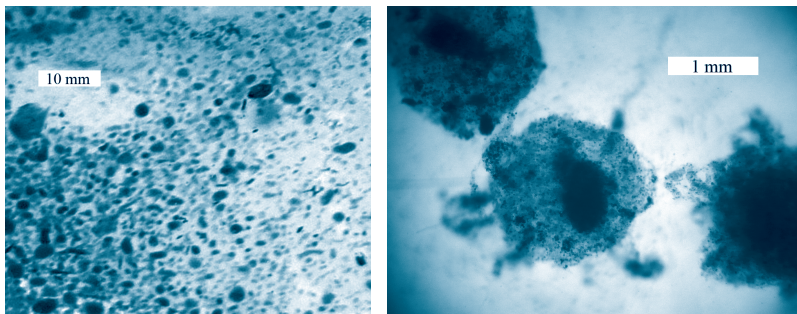


Рис. 6. Гранулы АИ, полученные в SBR режиме после пиковой нагрузки и голода.

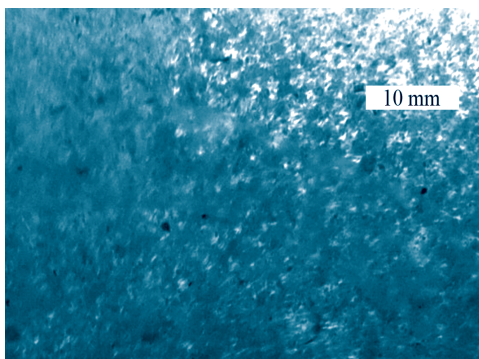


Рис. 7. Структура агрегатов АИ, полученных в SBR режиме после пиковой нагрузки без длительного голодания.

чение 2 недель проводился пересев содержимого колб (в объеме 35 мл) на новую порцию стока (100 мл среды) после UASB-реактора (сток №4).

Результаты показали (рис. 5), что ил способен развиваться в надильной жидкости, снижая ХПК среды без резкого распада гранул.

Во втором варианте в качалочную колбу были помещены 20 мл не содержащей гранул суспензии ила и 30 мл прошедшей через анаэробный реактор надильной жидкости. По ходу опыта через каждые 3 сут осуществлялся пересев на новую порцию надильной жидкости. Через 2 недели начиналось гранулообразование.

Грануляция при дефиците питания

Исследования, проведенные с модельным хозяйственно-бытовым стоком №3 и АИ №2 с использованием шейкера Heidolph Unimax 2010, показали, что важным условием новообразования гранул является их голодание после истощения органического субстрата в загрязненном стоке. Формированию гранул способствовал циклический режим очистки с доливом стока с высоким ХПК_{исх.} (до 2000

мг/л) с последующим длительным, около 10 сут, голоданием биоценоза после истощения субстрата. Голодание после пиковой нагрузки являлось определяющим фактором гранулообразования (рис. 6, 7).

При последующем стандартном циклическом режиме очистки (96 ч) модельного стока №3 с ХПК_{исх.} 350–450 мг/л примерно в 25% случаев гранулы не распались в течение 5 месяцев, но становились более рыхлыми и постепенно теряли свою форму и окислительную способность.

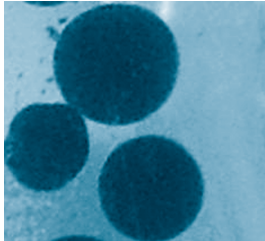
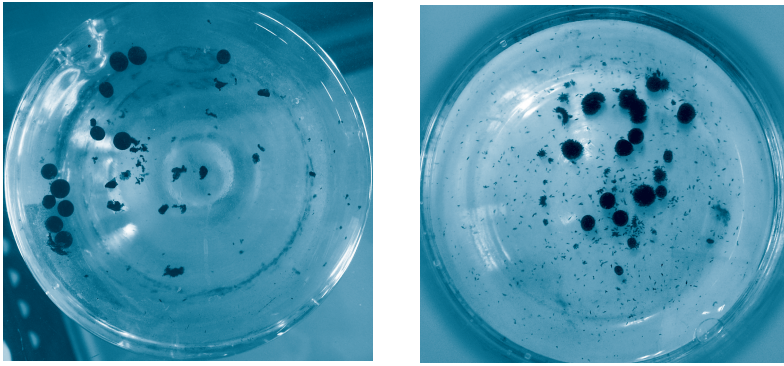
Влияние пероксида водорода на грануляцию непассированного к H₂O₂ ила

Исследования с добавлением пероксида водорода показали, что добавление H₂O₂ к непассированному к H₂O₂ илу снижает скорость гранулообразования и увеличивает время развития гранул. В опытах, проведенных с илом №1 и стоком №2, в течение месяца в контрольном варианте без добавления H₂O₂ произошло развитие гранул до стадии черного ила, в колбах с добавлением пероксида водорода равновесного количества гранул в среде не было достигнуто — в среде продолжалось гранулообразование. Кроме того, гранул в среде было меньше.

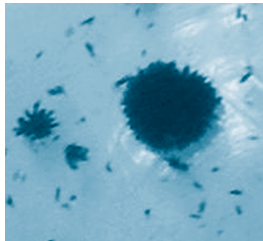
Однако при использовании ила, предварительно пассированного к H₂O₂, пероксид водорода в концентрациях вплоть до 0,6–1 г/л не угнетал развитие аэробного ила. Напротив, наблюдалась тенденция превышения скорости и уровня накопления биомассы в вариантах с внесением H₂O₂ относительно контроля (рис. 8).

Показанная с использованием различных модельных стоков и консорциумов микроорганизмов возможность образования гранулированного АИ в отъемно-доливном режиме в условиях постоянного аэрирования (за исключением 5-10 минутной стадии седиментации ила) указывает на универсальность явления гранулообразования, мало связанного с составом стоков и компонентов микробиоценоза, а также с особенностями механического перемешивания среды в условиях, не разрушающих гранулы.

По-видимому, решающими в процессе гранулообразования являются периодические отъемно-доливные условия автоселекции ила, происходящей при использовании режима окисления загрязнений при аэрации среды — седиментация АИ — удаление неседиментированной части клеток, а также длительное голодание ила.



При добавлении H_2O_2



Без добавления H_2O_2

Рис. 8. Сравнение морфологии гранул ила, образующихся при добавлении H_2O_2 в очищаемый сток. H_2O_2 добавляется к илу, предварительно пассированному к H_2O_2 .

Гранулы ила образуются в наибольшем количестве, с наибольшей скоростью и компактностью:

- при создании селективных условий для гранулообразующих микроорганизмов;
- при достаточной аэрации среды;
- при уровне ХПК до 7000 мг/л;
- при рН в диапазоне 7–8,5.

Присутствие в небольшом количестве таких водонерастворимых компонентов, как $CaCO_3$, не влияет на грануляцию ила. Повышенное содержание микроэлементов (Mn^{2+} и др.) в среде отрицательно влияет на гранулообразование. Во всех случаях гранулы нестабильны и распадаются через 50–60 сут после начала гранулообразования.

Внесение пероксида водорода в среду с гранулообразующим илом, предварительно не пассированным к H_2O_2 , приводило к существенному ухудшению скорости гранулообразования, однако если ил предварительно был пассирован к действию H_2O_2 , что проявлялось в его способности выдерживать более высокие концентрации пероксида водорода по сравнению с непассированным илом, внесение H_2O_2 способствовало гранулообразованию и повышало стабильность гранул.

Моделирование пиковых нагрузок по ХПК и последующего голодания АИ позво-

лило подобрать режим, в котором формировались гранулы диаметром от 2 до 5 мм с хорошей очищающей способностью. Эти гранулы стабилизировались при пассивировании с пероксидом водорода и выдерживали впоследствии до 1 г/л разового внесения пероксида водорода без угнетения активности ила.

Заключение

Полученные данные позволяют предложить новый прием к поддержанию устойчивости и работоспособности аэробного АИ в форме флоккул и гранул путем использования оптимальных доз пероксида водорода и ила, предварительно пассированного (адаптированного) к действию пероксида. Для выяснения эффективности данного приема применительно к совершенствованию аэробной стадии очистки целесообразны дальнейшие исследования по получению гранулированного аэробного АИ и использованию пероксида водорода.

Работа поддержана грантом Минобрнауки «Биоинженерия и биологическая основа новых высокоэффективных методов культивирования микроорганизмов и их применение в микробиологическом синтезе, при переработке отходов и биологической очистке» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 02.740.11.0784).

Литература

1. Psoch C. Critical flux aspect of air sparging and backflushing on membrane bioreactors / C. Psoch, S. Schiewer // Desalination. 2005. V. 175. №. 1. P. 61-71. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2004.09.023>.
2. Feng D. Ultrasonic defouling of reverse osmosis membranes used to treat wastewater effluents / D. Feng, J.S.J. van Deventer, C. Aldrich // Sep. Purif. Technol. 2006. V. 50, №. 3. P. 318-323. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2005.12.005>
3. Quarmby J. A comparative study of the structure of thermophilic and mesophilic anaerobic granules / J. Quarmby, C.F. Forster // Enzyme Microb. Tech. 1995. V. 17, №. 6. P. 493-498, URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0141-0229\(94\)00051-R](http://dx.doi.org/10.1016/0141-0229(94)00051-R).
4. Singh R.P. A critique on operational strategies for start-up of UASB reactors: effects of sludge loading rate and seed/biomass concentration / R.P. Singh, S.

- Kumar, C.S.P. Ojha // *Biochem. Eng. J.* 1998. V. 1, № 2. P. 107-119. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947\(97\)00086-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(97)00086-7).
5. An-jie Li. Effect of the food-to-microorganism (F/M) ratio on the formation and size of aerobic sludge granules / An-jie Li, Xiao-yan Li, Han-qing Yu // *Process Biochem.* 2011. V. 46, №. 12. P. 2269-2276. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2011.09.007>
6. Gobi K. Development and utilization of aerobic granules for the palm oil mill (POM) wastewater treatment / K. Gobi, M.D. Mashitah, V.M. Vadivelu // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 174, №. 1. P. 213-220. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.002>
7. Norhayati A. Aerobic granular sludge formation for high strength agro-based wastewater treatment / A. Norhayati, U. Zaini, Y. Adibah // *Biores. Technol.* 2011. V. 102, №12. P. 6778-6781. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.009>
8. Wan J. Evolution of bioaggregate strength during aerobic granular sludge formation / J. Wan, I. Mozo, A. Filali, A. Liné, Y. Bessière, M. Spérandio // *Biochem. Eng. J.* 2011. V. 58–59. P. 69-78. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2011.08.015>.
9. Su B. Optimal cultivation and characteristics of aerobic granules with typical domestic sewage in an alternating anaerobic/aerobic sequencing batch reactor / B. Su, X. Cui, J. Zhu // *Biores. Technol.* 2012. V. 110. P. 125-129. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.127>
10. Шагинурова Г.И. Биологические и биосорбционные процессы очистки сточных вод с применением микробных агрегатов на основе культур активного ила. Дис. на соискание ученой степени канд. тех.наук. Казань, 2002. 125 с.
11. Beun, J.J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor / J.J. Beun., M.C.M. van Loosdrecht, J.J. Heijnen // *Water Research.* 2002. V. 36. №3. P. 702-712. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00250-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00250-0).
12. РД 52.24.421-2012. Химическое потребление кислорода в водах. Методика измерений титриметрическим методом. Ростов–на–Дону: Росгидромет, 2012. 20 с.
13. Каленов С.В. Культивирование дрожжей и галобактерий в условиях контролируемого окислительного стресса. Дис.на соискание ученой степени канд. тех. наук. М., 2007. 200 с.
14. Пат. 2394098 РФ / Каленов С.В., Кузнецов А.Е. Способ культивирования дрожжей для спиртового производства. Заявлено 28.11.2007. Опубликовано: 10.07.2010. Бюл. №19. Приоритет 28.11.2007.
15. Сафронов В.В. Интенсивная малоотходная система биодеструкции загрязнений высококонцентрированных стоков. Диссертация на соискание степени канд. техн. наук. М., 2004. 195 с.

A.E. Kuznetsov, D.V. Kolotilin, N.S. Khokhlachev, S.V. Kalenov

AEROBIC BIOLOGICAL WASTE WATER TREATMENT UNDER CONDITIONS OF GRANULE FORMATION OF ACTIVE SLUDGE.

I. GRANULE FORMATION OF ACTIVE SLUDGE DURING TREATMENT OF MODEL EFFLUENTS.

Granule formation of aerobic active sludge during treatment of model effluents was studied. Most quantity of granules forms under conditions with pH 7–8.5, ХПК 400 - 5000 mg/L, without oxygen limit. It was shown that addition of active sludge to sublethal rate of hydrogen peroxide leads to granule formation and stabilization of new granules.

Key words: active sludge, aerobic granules, biological waste water treatment