

Влияние концентрации активного ила на скорость потребления кислорода в системах биоочистки сточных вод

Рецензия эксперта на статью получена
29.05.2026 [The expert review of the article
was received on May 25, 2026]

Аэрация служит наиболее энергоёмкой стадией биологической очистки сточных вод, и при её расчёте напрямую используют представление о механизме потребления кислорода активным илом. Активный ил представляет собой консорциум микроорганизмов, объединённых в хлопья (флокулы) — пористые агрегаты биомассы и внеклеточных полимерных веществ. Кислород расходуется в нём на два процесса: кatabолическое дыхание, то есть окисление поступающей органики, и эндогенное дыхание, связанное с распадом собственного клеточного материала.

Интенсивность этого потребления характеризуют скоростью поглощения кислорода (Oxygen Uptake Rate, *OUR*), а ключевым управляемым параметром выступает концентрация ила X , измеряемая как содержание взвешенных веществ иловой смеси (Mixed Liquor Suspended Solids, *MLSS*) в [г/л]. Согласно классическим рекомендациям, величину X удерживают в диапазоне 2–5 г/л [1], тогда как мембранные биореакторы работают при 10–15 г/л. Формально скорость потребления описывается произведением $OUR = q_{O_2} X$, где q_{O_2} — удельная скорость дыхания. Вместе с тем в исследованиях последних лет установлено, что q_{O_2} не остаётся постоянной, а снижается с ростом X из-за ограниченного массопереноса внутри флокул [2, 3].

Из сказанного следует, что линейная пропорциональность между *OUR* и X , нередко закладываемая в инженерные расчёты, является упрощением. Если удельная скорость дыхания зависит от концентрации биомассы, то с увеличением количества ила соразмерный прирост скорости потребления кислорода уже не достигается, и потребность в аэрации, рассчитанная по линейной модели, ока-

зывается завышенной либо заниженной в зависимости от режима. Несмотря на отдельные данные о диффузионном лимитировании во флокулах [2, 4], систематического описания формы зависимости *OUR* от X , пригодного для практических расчётов, пока недостаточно.

Целью настоящей работы является установление характера этой зависимости в широком диапазоне концентраций, выявление механизма, определяющего отклонение от линейности, и формулировка рекомендаций по выбору рабочей концентрации ила.

Активный ил — это консорциум микроорганизмов, объединённых в хлопья (флокулы), пористые агрегаты биомассы и внеклеточных полимерных веществ. Кислород расходуется в нём на два процесса: кatabолическое дыхание (окисление поступающей органики) и эндогенное дыхание, связанное с распадом собственного клеточного материала

Описание зависимости целесообразно начать с разделения наблюдаемой скорости на две составляющие. Наряду с объёмной скоростью *OUR* используют удельную скорость потребления кислорода (Specific Oxygen Uptake Rate, *SOUR*), равную отношению *OUR* к концентрации ила, $SOUR = OUR/X$, и выражаемую в миллиграммах кислорода на грамм биомассы в час. По смыслу *SOUR* совпадает с удельной скоростью дыхания q_{O_2} и отражает активность единицы биомассы независимо

УДК 628.35. Научная специальность: 2.1.4.

Влияние концентрации активного ила на скорость потребления кислорода в системах биологической очистки сточных вод

Даниил Евгеньевич Федотов, аспирант, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ, г. Нижний Новгород); Алексей Львович Васильев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии, ННГАСУ

В работе проанализирована зависимость скорости потребления кислорода (*OUR*) активным илом от концентрации биомассы (*MLSS*) в аэробных реакторах биологической очистки сточных вод. На основе теоретического анализа и респирометрического эксперимента при дозе ила 0,5–12 г/л установлено, что при низких концентрациях (до 2 г/л) рост *OUR* близок к линейному, в диапазоне 3–5 г/л замедляется вследствие диффузионных ограничений внутри хлопьев и снижения удельной скорости потребления кислорода (*SOUR*), а при концентрациях выше 6–8 г/л наступает кислородное лимитирование, и *OUR* определяется скоростью массопереноса. Предложена модифицированная кинетическая модель с поправочной функцией и эффективным коэффициентом диффузии. Результаты применимы при расчёте систем аэрации и выборе рабочей дозы ила.

Ключевые слова: активный ил, скорость потребления кислорода, концентрация ила, *MLSS*, диффузионное лимитирование, аэрация, мембранный биореактор.

UDC 628.35. Scientific specialty number: 2.1.4.

Effect of activated sludge concentration on oxygen consumption rate in biological wastewater treatment systems

Daniil E. Fedotov, postgraduate student, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU, Nizhny Novgorod); Alexey L. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Water Supply, Sanitation, Environmental Engineering and Chemistry, NNGASU

The work analyzes the dependence of the oxygen consumption rate (*OUR*) by activated sludge on the concentration of biomass (*MLSS*) in aerobic biological wastewater treatment reactors. Based on theoretical analysis and a respirometric experiment at a dose of 0.5–12 g/l of sludge, it was found that at low concentrations (up to 2 g/l), *OUR* growth is close to linear, in the range of 3–5 g/l it slows down due to diffusion restrictions inside the flakes and a decrease in the specific oxygen consumption rate (*SOUR*), and at concentrations of above 6–8 g/l, oxygen limitation occurs, and *OUR* is determined by the rate of mass transfer. A modified kinetic model with a correction function and an effective diffusion coefficient is proposed. The results are applicable in the calculation of aeration systems and the selection of the working sludge dose.

Key words: activated sludge, oxygen consumption rate, sludge concentration, *MLSS*, diffusion limitation, aeration, membrane bioreactor.



•• Здоровый активный ил в иловой камере очистных сооружений

от её количества. Если бы каждая клетка работала в одинаковых условиях, $SOUR$ оставалась бы постоянной, а OUR росла бы строго линейно с X . Дальнейшее изложение строится на последовательном рассмотрении причин, по которым это условие нарушается.

При избытке субстрата и растворённого кислорода удельная скорость дыхания приближается к своему максимальному значению q_{max} , и в этом режиме объёмная скорость действительно растёт пропорционально концентрации ила. Положение меняется, когда определяющим становится перенос кислорода внутрь флоккулы. Флоккула обладает пористой структурой, и эффективный коэффициент диффузии кислорода в ней составляет порядка 10^{-9} м²/с — приблизительно на порядок ниже, чем в воде. Глубину, на которую кислород проникает в флоккулу прежде, чем будет полностью израсходован, можно оценить по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{2D_{eff}C_{O,bulk}}{L_{max}\rho_X}}, \quad (1)$$

где δ — глубина проникновения кислорода, м; D_{eff} — эффективный коэффициент диффузии кислорода, м²/с; $C_{O,bulk}$ — концентрация кислорода в объёме жидкости, кг/м³; q_{max} — максимальная удельная скорость дыхания, с⁻¹; ρ_X — плотность биомассы во флоккуле, кг/м³.

С увеличением X флоккулы укрупняются и уплотняются, эффективный коэффициент диффузии снижается, и центральная часть агрегата переходит в анаэробический режим, где аэробное дыхание прекращается. По данным измерений микроэлектродами, концентрация кислорода во флоккуле падает до близких к нулю значений уже на небольшой глубине [2, 4].

Чтобы учесть эту неоднородность, наблюдаемую скорость удобно представить в виде $OUR = q_{max}Xf(X)$, где $f(X)$ — доля активной, обеспеченной кислородом биомассы. С ростом X функция $f(X)$ убывает, и объёмная скорость стремится к пределу. Дополнительное ограничение возникает на стороне газопереноса: при высокой концентрации ила возрастает вязкость иловой смеси, объёмный коэффициент массопередачи K_La снижается, и устанавливается верхняя граница скорости поступления кислорода $OUR_{max} = K_LaC_s$, где C_s — равновесная растворимость кислорода. Снижение K_La и коэффициента переноса с ростом $MLSS$ подтверждено для мембранных биореакторов [3].

Таким образом, отклонение зависимости OUR от X от линейной определяется совместным действием следующих четырёх факторов:

1. **Кинетического**, при котором в отсутствие ограничений скорость пропорциональна биомассе.
2. **Диффузионного**, связанного с истощением кислорода внутри флоккулы.

3. **Структурного**, отражаемого убыванием доли активной биомассы $f(X)$.

4. **Газопереносного**, ограничивающего поступление кислорода из пузырьков в жидкость.

Изложенные положения проверялись экспериментально. Исследование проводили в лабораторном реакторе объёмом 5 л при температуре +20°C и значениях pH в пределах 7,0–7,5; в качестве посевного материала использовали активный ил городских очистных сооружений. Терминология процесса принята в соответствии с ГОСТ 25150–82 [5]. Концентрацию ила X варьировали в диапазоне от 0,5 до 12 г/л, последовательно охватывая как классический, так и характерный для мембранных систем интервал. В качестве модельного субстрата применяли ацетат натрия с содержанием 200 мг ХПК/л; химическое потребление кислорода определяли по ГОСТ 31859–2012 [6]. Концентрацию растворённого кислорода поддерживали на уровне 2–3 мг/л, исключая её самостоятельное лимитирующее влияние. Скорость потребления кислорода измеряли респирометрическим методом; параллельно определяли $SOUR$, средний размер флоккул и вязкость иловой смеси.

Полученные данные о зависимости объёмной и удельной скоростей от концентрации ила сведены в табл. 1.

В этих данных прослеживается следующая устойчивая закономерность. Объёмная скорость OUR возрастает с концентрацией ила, но темп этого роста последовательно замедляется: почти линейный участок сохраняется до 2 г/л, далее прирост ослабевает, а после 8 г/л скорость выходит на плато. Удельная скорость $SOUR$ при этом убывает монотонно на всём диапазоне. Сопоставление крайних точек диапазона особенно показательное: при увеличении X с 1,0 до 12 г/л, то есть в 12 раз, объёмная скорость выросла лишь вчетверо, а $SOUR$ снизилась до 33 % исходного значения.

•• Зависимость OUR и $SOUR$ от концентрации активного ила

табл. 1

X , г/л	OUR , мг O_2 /(л·ч)	$SOUR$, мг O_2 /(г·ч)	Примечание
0,5	45	90	Высокая активность
1,0	88	88	Почти линейный рост
2,0	160	80	Начало снижения $SOUR$
3,0	220	73	Уплотнение флоккул
4,0	270	67,5	–
5,0	305	61	Вязкость выше в 1,5 раза
6,0	330	55	Диффузионное насыщение
8,0	350	43,7	K_La снижен на 20 %
10,0	355	35,5	Плато
12,0	358	29,8	Лимитирование аэрацией



❖ Переработанный активный ил

К этому следует добавить два наблюдения:

1. При низкой нагрузке на ил [F/M менее $0,05 \text{ г ХПК}/(\text{г}\cdot\text{сут.})$] удельная скорость падает до $10\text{--}20 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ даже при умеренной концентрации, что объясняется самостоятельным влиянием дефицита субстрата.
2. Средний диаметр флоккул увеличился с 50 мкм при $X = 1 \text{ г/л}$ до 250 мкм при $X = 10 \text{ г/л}$, а расчётная доля неактивных зон выросла с 5 до 55% .

Поскольку рост размера флоккул совпадает с падением $SOUR$, наблюдаемое замедление правомерно связать с внутренней структурой агрегатов. Для полученных зависимостей можно предложить непротиворечивое объяснение. Падение удельной активности с ростом концентрации обусловлено прежде всего диффузионным барьером: при укрупнении и уплотнении флоккул анаэробное ядро расширяется, и всё большая часть биомассы оказывается выключенной из аэробного дыхания. К этому добавляются конкуренция клеток за субстрат при низкой удельной нагрузке и ухудшение гидродинамических условий перемешивания вязкой иловой смеси. Эти результаты согласуются с данными о профилях кислорода во флоккулах и о снижении коэффициента массопередачи с ростом $MLSS$ [3, 4]. Практическое значение полученной картины состоит в следующем: рабочую концентрацию ила целесообразно удерживать в диапазоне $3\text{--}5 \text{ г/л}$, где удельная активность ещё высока; при переходе к более высоким значениям, характерным для мембранных биореакторов, расчётную подачу воздуха следует увеличивать не пропорционально приросту биомассы, а с поправкой, тогда как снижение $SOUR$ ниже $30 \text{ мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ можно рассматривать как признак избыточной концентрации. Следует отметить, что режим невысокой



удельной нагрузки на ил используется в инженерной практике и как осознанное проектное решение, когда приоритетом служат устойчивость процесса и малый прирост избыточного ила: А. Е. Новиков с соавторами, характеризуя малогабаритный биореактор очистки бытовых сточных вод, указывают, что он обеспечивает «низконагружаемую биотехнологию очистки бытовых сточных вод при высокой степени деструкции биогенных веществ» и незначительное образование избыточного ила [7, с. 384]. Полученные результаты ограничены постоянной температурой и составом субстрата и неприменимы к нитрифицирующему и гранулированному илу.

Заключение

Обобщая, отметим, что зависимость скорости потребления кислорода активным илом от концентрации биомассы носит выраженно нелинейный характер: линейный рост сохраняется примерно до 2 г/л , замедляется в интервале до 6 г/л и переходит в плато после 8 г/л , тогда как удельная скорость $SOUR$ на участке от 1 до 12 г/л

снижается приблизительно втрое. Новым результатом является количественное описание этого расхождения и установление того, что его основная причина — диффузионное лимитирование переноса кислорода внутри укрупняющихся флоккул, дополняемое снижением коэффициента массопередачи в вязкой иловой смеси. Теоретическое значение работы заключается в обосновании поправочной функции $f(X)$, благодаря которой формальное соотношение $OUR = q_{\max} X f(X)$ становится пригодным для инженерного расчёта, практическое — в выводе о целесообразности повышения $MLSS$ выше 6 г/л без сопутствующей интенсификации аэрации и в обосновании использования

$SOUR$ как оперативного диагностического параметра контроля диффузионного лимитирования. ●

1. Tchobanoglous G., Stensel H.D., Tsuchihashi R., Burton E.L. Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. 5th edition. McGraw-Hill Education. New York, NY, USA. 2014. 2048 p.
2. Shao Y., Tao X., Fan H. et al. Determination of critical dissolved oxygen for effective mass transfer of activated sludge flocs based on microelectrode detection technology. International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. Issue 9. Pp. 8243–8253.
3. Mahdhariza F., Georg W., Wille E.-M., Morck T. The impact of solid/floc holdup on oxygen transfer in a rotating hollow fiber membrane bioreactor under endogenous conditions. Water Science & Technology. 2023. Vol. 88. Issue 5. Pp. 1232–1245.
4. Daigger G.T., Adams C.D., Steller H.K. Diffusion of oxygen through activated sludge flocs: Experimental measurement, modeling, and implications for simultaneous nitrification and denitrification. Water Environment Research. 2007. Vol. 79. Issue 4. Pp. 375–387.
5. ГОСТ 25150–82. Канализация. Термины и определения / Дата введ.: 01.07.1983.
6. ГОСТ 31859–2012. Вода. Метод определения химического потребления кислорода (перездание) / Дата введ.: 01.01.2014.
7. Новиков А.Е., Филимонов М.И., Дугин Е.А. Проектирование и компоновка биореактора очистки бытовых сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. Наука и высшее профессиональное образование, 2022. №2. С. 379–387.

References — see page 80.

Effect of activated sludge concentration on oxygen consumption rate in biological wastewater treatment systems. Pp. 15–17.

Daniil E. Fedotov, postgraduate student, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU, Nizhny Novgorod); **Alexey L. Vasiliev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Water Supply, Sanitation, Environmental Engineering and Chemistry, NNGASU

1. G. Tchobanoglous, H.D. Stensel, R. Tsuchihashi, F.L. Burton. Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. 5th edition. McGraw-Hill Education. New York, NY, USA. 2014. 2048 p.
2. Y. Shao, X. Tao, H. Fan et al. Determination of critical dissolved oxygen for effective mass transfer of activated sludge flocs based on microelectrode detection technology. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 19. Issue 9. Pp. 8243–8253.
3. F. Mahdariza, W. Georg, E.-M. Wille, T. Morck. The impact of solid/floc holdup on oxygen transfer in a rotating hollow fiber membrane bioreactor under endogenous conditions. *Water Science & Technology*. 2023. Vol. 88. Issue 5. Pp. 1232–1245.
4. G.T. Daigger, C.D. Adams, H.K. Steller. Diffusion of oxygen through activated sludge flocs: Experimental measurement, modeling, and implications for simultaneous nitrification and denitrification. *Water Environment Research*. 2007. Vol. 79. Issue 4. Pp. 375–387.
5. GOST 25150–82 [The State Industry Standard of Russia No. 25150–82]. *Kanalizatsiya. Terminy i opredeleniya* [Sewage. Terms and Definitions]. Date of impl.: July 1, 1983. [In Russian]
6. GOST 31859–2012 [The State Industry Standard of Russia No. 31859–2012]. *Voda. Metod opredeleniya khimicheskogo potrebleniya kisloroda (pereizdanie)* [Water. Method for determining chemical oxygen demand (re-print)]. Date of impl.: January 1, 2014. [In Russian]
7. A.E. Novikov, M.I. Filimonov, E.A. Dugin. *Proektirovanie i komponovka bioreaktora ochistki bytovykh stochnykh vod* [Design and layout of a bioreactor for treating domestic wastewater]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa. Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex. Series: Science and Higher Professional Education]. 2022. No. 2. Pp. 379–387. [In Russian]