



УДК 628.35

doi: 10.55287/22275398_2026_59_33

ВЛИЯНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СКОРОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Д. Е. Федотов
А. Л. Васильев

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород

Аннотация

Скорость биологической очистки сточных вод определяется ростом и ферментативной активностью микробных сообществ активного ила и биоплёнки и зависит от обеспеченности биогенными элементами — углеродом, азотом, фосфором — и микроэлементами. Цель работы — количественная характеристика влияния биогенной обеспеченности на кинетику очистки и разработка алгоритма коррекции состава сточных вод. Модельный эксперимент поставлен на трёх типовых объектах: городских очистных сооружениях с умеренным дефицитом фосфора, локальных сооружениях молокоперерабатывающего предприятия с резким совместным дефицитом азота и фосфора и анаэробном UASB-реакторе с дефицитом кобальта и никеля. На каждом объекте после ввода корректирующей добавки до целевого соотношения БПК:N:P = 100:5:1 либо до восполнения микроэлементов на протяжении 14–20 суток фиксировались скорость окисления, иловый индекс, остаточные концентрации загрязнителей, а для анаэробного реактора — удельный выход метана и концентрация летучих жирных кислот. Установлено, что адресное восполнение дефицитного элемента восстанавливает кинетику процесса в пределах одной–двух недель: при умеренном дефиците фосфора скорость очистки по БПК выросла более чем вдвое, при совместном дефиците азота и фосфора объёмная скорость удаления БПК — приблизительно в шесть раз, при дефиците кобальта и никеля восстановлен ранее остановившийся метаногенез. Новизна работы состоит в сопоставлении конкретных видов биогенного дисбаланса с измеренным откликом разнотипных систем и в формулировке алгоритма диагностики и коррекции биогенного питания, пригодного для повышения пропускной способности очистных сооружений без их реконструкции.

Ключевые слова

Биологическая очистка сточных вод; активный ил; биогенные элементы; азот; фосфор; микроэлементы; кинетика очистки; иловый индекс.

Дата поступления в редакцию

28.05.2026

Дата принятия к печати

03.06.2026

Введение

Биологическая очистка сточных вод реализуется за счёт метаболической активности микробных сообществ — активного ила в виде взвешенной биомассы либо биоплёнки, закреплённой на носителе. Скорость окисления органических веществ и удаления соединений азота и фосфора зависит от скорости роста бактерий и активности их ферментных систем, а те, в свою очередь, — от обеспеченности сообщества биогенными элементами: углеродом, азотом и фосфором, образующими основу клеточных струк-

тур и ферментов. В инженерной практике закрепилось эталонное массовое соотношение БПК:N:P = 100:5:1 как ориентир сбалансированного питания аэробных систем. В исследованиях последних лет это представление уточнено: установлено, что углерод, азот и фосфор образуют базу роста и метаболизма микроорганизмов и непосредственно влияют на устойчивость работы очистных систем [1]. В ряде работ показано также, что для достоверного моделирования удаления биогенов и расхода энергии требуется корректная оценка кинетических параметров процесса [2].

Количественная связь между обеспеченностью биогенными элементами и кинетикой очистки систематизирована не в полной мере, что осложняет принятие инженерных решений — прежде всего для промышленных стоков, обеднённых азотом, фосфором или микроэлементами. Дополнительная сложность состоит в том, что при дефиците биогенов изменяется не только скорость процесса, но и структура микробного сообщества, а также седиментационные свойства хлопьев активного ила [3]. С учётом этого цель настоящей работы определена как количественная характеристика влияния биогенных элементов на кинетику биологической очистки на трёх типовых объектах и разработка инженерного алгоритма коррекции их состава. Новизна работы состоит в сопоставлении конкретных видов биогенного дисбаланса с измеренным откликом разнотипных систем — аэробных и анаэробной — и в формулировке практически применимого алгоритма диагностики и коррекции биогенного питания.

Методология

Для проверки влияния биогенной обеспеченности на кинетику очистки модельный эксперимент поставлен на трёх типовых объектах:

- 1) Городские очистные сооружения производительностью 25 000 м³/сут (аэротенк с регенератором), где зафиксирован умеренный дефицит фосфора при фактическом соотношении C:N:P ≈ 100:4,3:0,43.
- 2) Локальные сооружения молокоперерабатывающего предприятия на 400 м³/сут (аэротенк продлённой аэрации) с резким совместным дефицитом азота и фосфора, соотношение ≈ 100:0,25:0,10.
- 3) Анаэробный UASB-реактор пивоваренного производства на 150 м³/сут (мезофильный режим, 35 °С) с дефицитом кобальта и никеля при сбалансированных углероде, азоте и фосфоре.

Для каждого объекта заданы стартовые условия — входные концентрации БПК (ХПК), общего азота и фосфора, температура и pH иловой смеси, доза и возраст активного ила, объёмная нагрузка. Со вторых-третьих суток вводилась корректирующая добавка до целевого соотношения 100:5:1 либо до восполнения дефицитных микроэлементов, после чего на протяжении 14–20 суток фиксировался отклик системы: скорость окисления по БПК, иловый индекс, ХПК и остаточные концентрации азота и фосфора в осветлённой воде, а для анаэробного реактора дополнительно — удельное образование метана и концентрация летучих жирных кислот. Аналитический контроль выполнялся стандартизованными методами; методы определения азотсодержащих веществ регламентированы межгосударственным стандартом [4], расчётные параметры сооружений приняты по действующему своду правил [5]. Применённая схема контроля согласуется с практикой проектирования сооружений с приоритетным удалением биогенных элементов на основе математического и опытно-эксплуатационного моделирования, при которой измерения ведутся по растворённому кислороду, аммоний- и нитрат-ионам инструментальными методами [6].

Результаты исследования

Для интерпретации полученных данных необходимо предварительно рассмотреть физиологическую роль каждого элемента. Азот составляет порядка 15–20 % сухой массы бактериальной биомассы, входя в состав аминокислот, белков и ферментов, которые катализируют окисление органических веществ и аммония. При снижении доли азота ниже эталонной — то есть при соотношении БПК:N выше 100:5 — кинетика процесса ухудшается: замедляется потребление БПК, ослабевает прирост биомассы, образуются мелкие, плохо оседающие хлопья. Под нитрификацией здесь понимается биологическое окисление аммонийного азота до нитритов и нитратов автотрофными бактериями; этот процесс особенно чувствителен к недостатку азота как субстрата и строительного материала. Азот способен оказывать и угнетающее действие: в форме свободного аммиака, доля которого возрастает при pH выше 7,5–8,0, он токсичен для микрофлоры, причём нитрифицирующие бактерии подавляются при меньших концентрациях, чем гетеротрофные. По этой причине регулирование азотного питания включает не только устранение дефицита, но и предотвращение избытка.

Фосфор выполняет в клетке иные функции, и характер его дефицита также иной. Фосфор участвует в энергетическом обмене, входя в состав аденозинтрифосфата — основного внутриклеточного переносчика энергии, — а также в построение нуклеиновых кислот и фосфолипидов клеточных мембран. При дефиците фосфора (соотношение БПК:P выше 100:1) снижается скорость окисления органических веществ и ухудшаются седиментационные свойства ила вплоть до вспухания. Под вспуханием активного ила понимается нарушение его осаждаемости, вызванное преимущественным развитием нитчатых микроорганизмов и сопровождающееся ростом илового индекса — объёма, занимаемого одним граммом ила после отстаивания. По данным работы [3], при отсутствии азота и фосфора изменяются состав микробного сообщества и характеристики хлопьеобразования, а чрезмерное развитие нитчатых форм существенно повышает иловый индекс и приводит к выносу биомассы с очищенной водой. В отличие от азота, избыток фосфора не токсичен для микрофлоры, однако при сбросе в водоём-приёмник возникает риск эвтрофикации.

Поскольку азот и фосфор выполняют разные функции, эталонное соотношение БПК:N:P = 100:5:1 соответствует потребности биомассы в этих элементах, пропорциональной количеству окисляемого органического вещества. При значимом отклонении от эталона скорость очистки снижается в обе стороны: недостаток лимитирует процесс, избыток не ускоряет его и может оказаться вредным. Типичное потребление составляет 1–3 кг азота и 0,2–0,6 кг фосфора на каждые 100 кг снятой БПК. Дефицит биогенных элементов проявляется в наборе взаимосвязанных признаков:

- замедление потребления БПК (по разным оценкам, на 30–70 %) и слабый прирост биомассы активного ила;
- образование мелких, плохо оседающих хлопьев и повышение илового индекса;
- развитие нитчатых микроорганизмов и вспухание ила, прежде всего при недостатке фосфора;
- помутнение очищенной воды и подавление либо полное прекращение нитрификации.

Помимо трёх основных биогенных элементов, на кинетику очистки влияет обеспеченность микроэлементами — металлами, которые требуются в концентрациях от микрограммов до единиц миллиграммов на литр и выполняют функции кофакторов ключевых ферментов. При их недостатке отдельные биохимические реакции замедляются даже при сбалансированном соотношении C:N:P. Основные микроэлементы, их физиологическая роль и последствия дефицита приведены в *таблице 1*.

Микроэлементы как кофакторы ферментов активного ила и последствия их дефицита

Элемент	Физиологическая роль	Последствия дефицита	Потребность, мг/л
Fe (II, III)	Кофактор цитохромов, каталаз, пероксидаз	Накопление пероксида водорода, повреждение клеток	0,1–0,5
Mg (II)	Стабилизация молекулы АТФ, активация фосфатаз	Ухудшение биологического удаления фосфора	1–5
Co (II)	Синтез витамина В ₁₂ , участие в метаногенезе	Накопление пропионовой кислоты, угнетение анаэробного процесса	0,01–0,1
Mo	Кофактор нитратредуктазы	Накопление нитратов, нарушение денитрификации	0,005–0,05
Ni	Кофактор уреазы и гидрогеназы	Снижение активности метаногенных архей	0,05–0,5
Zn, Cu, Mn	Кофакторы ряда ферментов	Снижение общей ферментативной активности	0,01–0,5

Указанные потребности являются ориентировочными и зависят от состава стока и типа процесса. Для промышленных стоков, обеднённых металлами, на крупных сооружениях применяются комплексные растворы микроэлементов, дозируемые совместно с основными биогенными добавками.

Динамика контролируемых показателей на трёх объектах при коррекции биогенного состава приведена в **таблице 2**. На первом объекте — городских очистных сооружениях с умеренным дефицитом фосфора — на фоновом этапе скорость очистки по БПК составляла 39–41 % проектной при иловом индексе 218–224 мг/л. После ввода фосфорной кислоты концентрация фосфора в осветлённой воде поднялась до 0,6–0,7 мг/л, скорость очистки к 14-м суткам достигла 96 % проектной, иловый индекс снизился до 99 мг/л, а ХПК осветлённой воды — с 72 до 23 мг/л. На втором объекте — локальных сооружениях молокоперерабатывающего предприятия с резким совместным дефицитом азота и фосфора — на фоновом этапе наблюдался вынос активного ила, а объёмная скорость удаления БПК не превышала 0,5 кг/(м³·сут). После дозирования карбамида и фосфата до соотношения 100:5:1 доза ила выросла, иловый индекс стабилизировался на уровне около 120 мг/л, а объёмная скорость удаления БПК к 14-м суткам увеличилась до 3,05 кг/(м³·сут). На третьем объекте — анаэробном UASB-реакторе с дефицитом кобальта и никеля — на фоновом этапе удельное образование метана не превышало 0,05 м³/кг снятой ХПК при концентрации летучих жирных кислот 3650–3900 мг/л. После внесения кобальта и никеля концентрация летучих жирных кислот снизилась до 280 мг/л, конверсия ХПК выросла с 22 до 87 %, а удельный выход метана к 20-м суткам достиг 0,32 м³/кг снятой ХПК.

Таблица 2

Динамика контролируемых показателей на трёх объектах при коррекции биогенного состава

Показатель	Фон (1 сут)	Старт (3 сут)	5–6 сут	7 сут	10 сут	14 сут	20 сут
Объект 1 — городские очистные сооружения, дефицит фосфора							
Скорость очистки по БПК, % проектной	41	43	64	86	94	96	–
Иловый индекс, мг/л	218	220	184	142	108	99	–
ХПК осветлённой воды, мг/л	72	70	51	33	25	23	–

Объект 2 — сооружения молокозавода, дефицит азота и фосфора

Скорость удаления БПК, кг/(м ³ ·сут)	0,52	0,55	1,15	2,05	2,80	3,05	–
Иловый индекс, мг/г	вынос ила	260	205	158	132	118	–
БПК осветлённой воды, мг/л	480	470	320	190	95	70	–

Объект 3 — анаэробный UASB-реактор, дефицит кобальта и никеля

Конверсия ХПК, %	22	19	38	62	81	–	87
ЛЖК (по уксусной кислоте), мг/л	3650	3900	3100	1450	540	–	280
Удельный выход СН ₄ , м ³ /кг снятой ХПК	0,04	0,05	0,11	0,21	0,29	–	0,32

Для всех трёх объектов прослеживается общая закономерность: адресное восполнение дефицитного элемента восстанавливает кинетику процесса в пределах одной-двух недель, причём величина эффекта тем больше, чем сильнее исходный дисбаланс. При умеренном дефиците фосфора скорость очистки выросла более чем вдвое, тогда как при резком совместном дефиците азота и фосфора объёмная скорость увеличилась приблизительно в шесть раз. Полученные данные о чувствительности анаэробного реактора к микроэлементам соответствуют экспериментальным результатам, согласно которым дозирование микроэлементов повышает выход метана и устойчивость анаэробного процесса [7, 8]; при этом установлены и рациональные диапазоны: для кобальта, никеля и железа — соответственно до 5, 10 и 200 мг/л, а превышение этих значений подавляет процесс [9].

Полученные результаты соотносятся также с данными отечественной практики о роли структурной организации сооружений. В работе [9] при реконструкции очистных сооружений за счёт сочетания анаэробной и аэробной зон достигнута более глубокая очистка от биогенных элементов; там же отмечено, что денитрификация менее энергозатратна, а прирост активного ила на этой стадии ниже, чем на стадии окисления. Из этого следует, что коррекция биогенного состава и рациональная компоновка зон представляют собой взаимодополняющие средства интенсификации очистки. На основе полученных результатов можно сформулировать алгоритм коррекции биогенного питания, применимый в эксплуатации. Алгоритм включает следующие этапы:

- 1) расчёт фактического массового соотношения С(БПК):N:P по результатам аналитического контроля и его сравнение с эталонным;
- 2) выбор корректирующих добавок: для азота – карбамид, сульфат аммония или аммиачная вода, для фосфора — фосфорная кислота и её соли, для микроэлементов — комплексные смеси либо индивидуальные соли металлов;
- 3) расчёт дозы исходя из восполнения дефицитного элемента до эталонного соотношения с учётом текущего потребления биомассой;
- 4) контроль эффекта по скорости потребления кислорода, приросту ила, мутности и остаточным концентрациям аммония и фосфатов в осветлённой воде.

При соблюдении этой последовательности баланс биогенов поддерживается управляемо, а не эпизодически. Практическое применение алгоритма расширяется при сочетании с автоматизированным управлением. С помощью средств непрерывного измерения концентраций аммония, нитратов и фосфатов, интегрированных с системами диспетчерского контроля и сбора данных, дозирование реагентов

корректируется в реальном времени, что снижает влияние человеческого фактора. Экономический эффект таков, что при сбалансированном биогенном питании скорость очистки возрастает в 1,5–3 раза, благодаря чему на существующих мощностях возможна обработка большего объёма стоков и отсрочка капиталоёмкой реконструкции; предупреждение нарушений процесса — вспухания ила, накопления аммония — сокращает издержки аварийных режимов. Целесообразность предварительного моделирования таких режимов подтверждена в современных работах [2].

Заключение

По итогам исследования получена количественная характеристика влияния биогенной обеспеченности на кинетику биологической очистки сточных вод. В эксперименте на трёх типовых объектах установлено, что отклонения массового соотношения С:N:P и дефицит микроэлементов переводятся в измеримые потери производительности, а адресное восполнение дефицитного элемента восстанавливает кинетику процесса в течение одной-двух недель: при умеренном дефиците фосфора скорость очистки по БПК повысилась более чем вдвое, при резком совместном дефиците азота и фосфора объёмная скорость удаления БПК — приблизительно в шесть раз, а при дефиците кобальта и никеля в анаэробном реакторе восстановлен ранее остановившийся метаногенез. Теоретическое значение полученных результатов заключается в уточнении представления о биогенном лимитировании как самостоятельном кинетическом факторе, действующем независимо от гидравлических и кислородных условий; практическое значение состоит в том, что предложенный алгоритм применим для повышения пропускной способности очистных сооружений без их реконструкции, для предупреждения нарушений процесса и для обоснованного встраивания дозирования биогенных и микроэлементных добавок в автоматизированные системы управления.

Библиографический список

1. *Chen Y., Jiang X., Yang M., Wang Z.* Biotechnology revival: in situ sludge minimization in wastewater // *Frontiers in Microbiology*. 2025. Vol. 16. Art. 1603215. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1603215.
2. *Szelag B., Kiczko A., Zaborowska E., Mannina G., Makinia J.* Modeling nutrient removal and energy consumption in an advanced activated sludge system under uncertainty // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 323. Art. 116040. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116040.
3. *Gao C., Tian Z., Yang F., Sun D., Liu W., Peng Y.* Absence of nitrogen and phosphorus in activated sludge: impacts on flocculation characteristics and the microbial community // *Journal of Water Process Engineering*. 2023. Vol. 54. Art. 103984. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103984.
4. ГОСТ 33045-2014. Вода. Методы определения азотсодержащих веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 24 с.
5. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. М.: Стандартинформ, 2019. 81 с.
6. *Павлова И. В., Постникова И. Н., Исаков И. В., Преснякова Д. А.* Исследование и оптимизация процесса биологической очистки сточных вод по результатам математического и опытно-эксплуатационного моделирования // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. № 1 (12). С. 90–96.
7. *Salazar-Batres K. J., Moreno-Andrade I.* Review of the effects of trace metal concentrations on the anaerobic digestion of organic solid waste // *BioEnergy Research*. 2025. Vol. 18. Art. 24. DOI: 10.1007/s12155-025-10826-y.

8. Mary T., Kannoth S., Harishma S. Experimental analysis on the effects of trace metals as micronutrients in enhancing biomethane production // Sustainable Energy Research. 2024. Vol. 11. Art. 1. DOI: 10.1186/s40807-023-00093-w.

9. Саинова В. Н., Катков И. С., Хунас К. Реконструкция сооружений биологической очистки сточных вод с целью интенсификации извлечения биогенных элементов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 320 – 326.

INFLUENCE OF BIOGENIC ELEMENTS ON THE RATE OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

D. E. Fedotov
A. L. Vasilyev

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod

Abstract

The rate of biological wastewater treatment is governed by the growth and enzymatic activity of activated sludge and biofilm communities and depends on the supply of nutrients — carbon, nitrogen and phosphorus — and of trace elements. The aim is to quantify the effect of nutrient availability on treatment kinetics and to develop an engineering algorithm for correcting wastewater composition. A model experiment was carried out on three typical objects: a municipal treatment plant with a moderate phosphorus deficiency, dairy-plant local facilities with a severe combined nitrogen and phosphorus deficiency, and an anaerobic UASB reactor with a cobalt and nickel deficiency. After a corrective additive was introduced up to the target ratio BOD:N:P = 100:5:1 or to trace-element replenishment, the oxidation rate, sludge volume index, residual pollutant concentrations and — for the anaerobic reactor — the specific methane yield and volatile fatty acid concentration were recorded over 14–20 days. Targeted replenishment of the deficient element restores process kinetics within one to two weeks: under a moderate phosphorus deficiency the BOD treatment rate increased more than twofold, under a combined nitrogen and phosphorus deficiency the volumetric BOD removal rate increased about sixfold, and under a cobalt and nickel deficiency the previously arrested methanogenesis was restored. The novelty lies in relating specific types of nutrient imbalance to the measured response of dissimilar systems and in formulating an algorithm for diagnosing and correcting nutrient supply, suitable for increasing plant throughput without reconstruction.

The Keywords

Biological wastewater treatment; activated sludge; nutrients; nitrogen; phosphorus; trace elements; treatment kinetics; sludge volume index.

Date of receipt in edition

28.05.2026

Date of acceptance for printing

03.06.2026

Ссылка для цитирования:

Д. Е. Федотов, А. Л. Васильев. Влияние биогенных элементов на скорость биологической очистки сточных вод. — Системные технологии. — 2026. — № 2 (59). — С. 33 – 39.