

**АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ
АНАЭРОБНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

А. А. ФОМЕНКОВА

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Росси
a.a.fomenkova@mail.ru*

Аннотация. Предлагается учитывающая взаимное влияние физических и биохимических процессов структурная модель взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод. Модель позволяет анализировать работоспособность систем анаэробной биологической очистки при эксплуатации. Обосновывается необходимость непрерывного контроля технического состояния этих систем, ориентированного, в первую очередь, на выявление причин деградации микроорганизмов. На основе общего подхода к диагностике сложных технических систем предложены алгоритмы непрерывного контроля технического состояния системы анаэробной биологической очистки сточных вод, позволяющие выявить причины неисправностей различной природы и сократить число проводимых лабораторных исследований.

Ключевые слова: анаэробная очистка сточных вод, техническое состояние, наблюдаемые параметры, деградация биомассы, алгоритмы анализа технического состояния, диагностика сложных систем, модель анаэробного брожения

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00747.

Ссылка для цитирования: Фоменкова А. А. Анализ работоспособности систем анаэробной биологической очистки сточных вод в процессе эксплуатации // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 140—147. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-140-147.

**ANALYSIS OF THE PERFORMANCE
OF ANAEROBIC BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT
SYSTEMS DURING OPERATION**

A. A. Fomenkova

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
a.a.fomenkova@mail.ru*

Abstract. A structural model of processes interrelation in biological wastewater treatment is proposed. The model accounts for the mutual influence of physical and biochemical processes and provides an analysis of the performance of anaerobic biological treatment systems during operation. It has been proven that continuous monitoring of the technical condition of these systems is necessary, focused primarily on identifying the causes of degradation of microorganisms. Based on a general approach to diagnostics of complex technical systems, algorithms for continuous monitoring of the technical condition of an anaerobic biological wastewater treatment system are proposed, which make it possible to identify the causes of malfunctions of various nature and reduce the number of laboratory tests carried out.

Keywords: anaerobic wastewater treatment, technical state, observed parameters, biomass degradation, algorithms of technical state analysis, complex systems diagnostics, anaerobic digestion model

Acknowledgments: the work was supported by RFBR grant No. 20-08-00747.

For citation: Fomenkova A. A. Analysis of the performance of anaerobic biological wastewater treatment systems during operation. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 140—147 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-140-147.

Введение. Одной из важных тенденций развития инфраструктуры промышленных предприятий, направленных на повышение их экологической безопасности, является использование локальных систем очистки сточных вод. В частности, для производств пищевой промышленности характерно использование многоэтапной очистки сточных вод с использованием механических, физико-химических и биологических методов очистки. Высокое содержание органических веществ в сточной воде обуславливает применение анаэробных методов биологической очистки, основанных на особенностях жизнедеятельности микроорганизмов. Это, в свою очередь, делает актуальной задачу непрерывного контроля технического состояния (ТС) локальных очистных сооружений. Сложность оценки ТС систем очистки и необходимость оценивания жизнеспособности микроорганизмов на этапе биологической очистки требуют построения структурной модели взаимосвязей процессов различной природы при анаэробном брожении.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритмов непрерывного оценивания технического состояния систем анаэробной биологической очистки (САБО), основанных на моделировании взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод и жизнедеятельности анаэробного биоценоза с технологическими особенностями организации процесса очистки и конструктивной спецификой оборудования, с использованием методологии диагностики сложных систем [1—3].

Постановка задачи оценки технического состояния системы анаэробной биологической очистки. В последнее время все большее внимание уделяется локальным очистным сооружениям предприятий пищевой промышленности. Функционирование этих сооружений требует непрерывного контроля их технического состояния, что связано как с соблюдением необходимых параметров технологического процесса, так и с обеспечением экологической безопасности производства, требования к которым постоянно ужесточаются. В этой связи непрерывный анализ технического состояния системы очистки сточных вод предприятия имеет важное практическое значение как в процессе эксплуатации, так и при принятии решений по предотвращению аварийных ситуаций. Для предприятий пищевой промышленности важным и наименее исследованным элементом системы очистки сточных вод являются анаэробные биореакторы, функционирование которых во многом зависит от состояния биомассы, выполняющей разложение органических отходов. Анализ работоспособности такой системы требует выделения параметров ее функционирования. В общем случае локальная анаэробная система очистки характеризуется:

1) входными параметрами системы U , включающими концентрацию загрязнений в сточной воде S_{in} , объем сточных вод, поступающих на очистку в единицу времени Q_{in} , температуру θ_{in} ;

2) выходными параметрами системы Y , характеризующими свойства очищенной воды Y_{CB} и образованного в процессе разложения органического вещества биогаза Y_G ;

3) параметрами внутреннего состояния системы X , определяющими процесс анаэробного брожения и включающими параметры как биомассы B_x , так и сточной воды: концентрации загрязнений S_x , промежуточных P_x и конечных G_x продуктов биохимического преобразования органических веществ, гидродинамическую обстановку в биореакторе, определяемую полем скоростей газожидкостной среды W , температурный режим в биореакторе θ .

Основным элементом функционирования анаэробной системы очистки, в наибольшей степени определяющим ее работоспособность, является биомасса, состояние которой, однако, не может быть непосредственно оценено инструментальными методами. Поэтому основная задача настоящей работы заключается в разработке алгоритмов непрерывного контроля работоспособности системы анаэробной очистки, которые на основе доступных к измерению параметров позволят оценить техническое состояние с учетом состояния биомассы, обеспечат своевременное принятие решений в процессе эксплуатации. Решение этой задачи связано с

необходимостью анализа модели взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод и жизнедеятельности анаэробной биомассы при заданных параметрах входного потока, состояния окружающей среды и ограничениях на допустимые режимы работы биореактора.

Структурная модель взаимосвязей процессов биологической очистки сточных вод и жизнедеятельности анаэробного биоценоза. Очистка сточных вод в САБО происходит в результате поэтапного преобразования органических веществ микробной популяцией в условиях, задаваемых технологическими режимами эксплуатации очистных сооружений. Особенностью систем анаэробной биологической очистки является то, что множество биохимических и физических процессов, определяющих закономерности разложения органических загрязнений сточной воды, происходят параллельно. Общая взаимосвязь этих процессов, описанная через параметры состояния системы, показана на рис. 1.

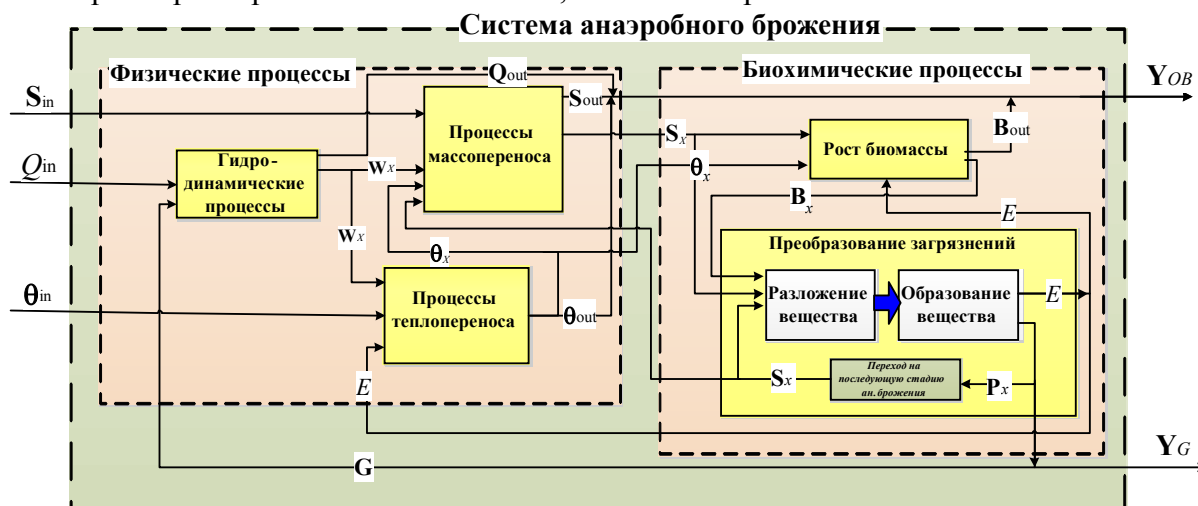


Рис. 1

На рис. 1 выделены различные уровни декомпозиции процессов в анаэробном биореакторе. Физические процессы, включающие массоперенос, теплоперенос и гидродинамические процессы, оказывают непосредственное влияние на рост, развитие биомассы и преобразование ею органических загрязнений. Физические и биохимические процессы в анаэробном биореакторе тесно взаимосвязаны и должны рассматриваться как единое целое. В модели (см. рис. 1) параметры системы даны в обобщенном виде.

Система анаэробной биологической очистки представляет собой многомерный, многосвязный, нестационарный объект, рассчитанный на длительный срок эксплуатации; этот объект чувствителен к изменению внешних воздействий, влияющих на условия жизнедеятельности микрофлоры. В процессе эксплуатации САБО важно своевременно принимать решения по техническому обслуживанию системы, на основе непрерывного контроля ее технического состояния. Общий подход к оцениванию ТС САБО разработан недостаточно [4—6], это негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках систем очистки и снижает их экологическую безопасность.

Особенности анализа технического состояния системы анаэробной биологической очистки сточных вод. Для оценивания ТС САБО предлагается использовать общий подход [1—3] диагностики сложных систем, выделяющий, как правило, три основных ТС системы — работоспособное, неработоспособное, частично работоспособное. Применительно к процессам анаэробной биологической очистки эти состояния должны быть дополнены оценкой состояния биомассы в биореакторе V_x . В процессе жизнедеятельности биомассы могут изменяться состав и численность популяции микроорганизмов, формы существования клеточных агрегатов, происходит развитие биомассы или ее деградация, связанная со снижением активности микроорганизмов, уменьшением удельной скорости их роста и развития популяции. Именно связанные с деградацией биомассы процессы, которые могут происходить в полно-

стью работоспособном состоянии биореактора, являются основным фактором выхода САБО из строя, практически не поддаются учету на этапе проектировании системы и непосредственному анализу в процессе эксплуатации. Исходя из специфики работы САБО предлагается следующая модель оценивания ее технического состояния (рис. 2, S_{out} — остаточная концентрация загрязнений в очищенной воде, S_{norm} — заданная максимальная концентрация загрязнений в очищенной воде, I_G — производительность системы по биогазу, I_{cp} — средний расчетный выход биогаза для данного типа сырья, $Q_{расч}$ — расход жидкости, предусмотренный технологическим процессом, CH_4 — содержание метана в биогазе).

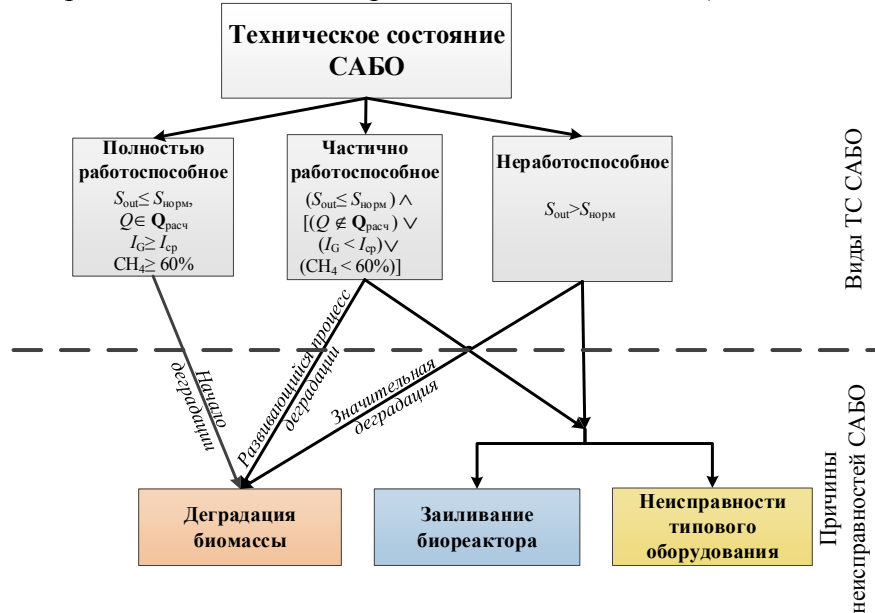


Рис. 2

Своевременное выявление начальных этапов дегградации биомассы дает возможность принятия соответствующих решений и, таким образом, существенно влияет на эффективность использования системы. К основным факторам, вызывающим дегградацию биомассы при анаэробном брожении, относят [4—10]: воздействие высоких концентраций субстрата на биомассу; недостаточное питание биомассы; разрушение клеточных агрегатов; нарушение температурного режима технологического процесса очистки; воздействие токсических веществ на биомассу; повышенную нагрузку по сточной воде на биореактор; недостаточное время обработки стока.

Указанные причины дегградации биомассы положены в основу классификации ТС САБО, в результате получено множество технических состояний $St = \{St_i | i = \overline{1,16}\}$. Из выделенного множества St состояние St_1 соответствует полностью работоспособному техническому состоянию без признаков дегградации биомассы, $St_2—St_6$ — работоспособному состоянию с признаками начала дегградации биомассы, $St_7—St_{11}$ — частично работоспособному и $St_{12}—St_{16}$ — неработоспособному состоянию, потеря работоспособности в которых вызвана различными причинами угнетения микроорганизмов. Дальнейший синтез алгоритма анализа ТС САБО, учитывающего причины дегградации микробной популяции, требует выделения параметров, несущих информацию о состоянии системы в целом и биомассы, в частности.

Наблюдаемые параметры при мониторинге ТС САБО с учетом состояния биомассы. В общем случае состояние микроорганизмов определяется вполне конкретными параметрами: концентрацией биомассы в биореакторе B , удельной скоростью роста μ и отмирания k_d популяции, скоростью потребления субстрата Y_S и производства продуктов метаболизма Y_P , удельной активностью метаногенов SMA . Эти параметры, формирующие вектор состояния биомассы \mathbf{V}_x , невозможно измерить напрямую в процессе эксплуатации САБО. Однако как

развитие биомассы, так и ее деградация, проявляются в изменении показателей протекания технологического процесса очистки, доступных к измерению и косвенно указывающих на уровень активности и жизнеспособности микроорганизмов.

На основе структурной модели (см. рис. 1) сформировано множество диагностических признаков САБО $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1,19}\}$, разработано формальное описание процесса анаэробной очистки в виде обобщенной математической модели [11], при численном решении которой составлена модель анаэробного биореактора как объекта анализа ТС. Полученная модель позволила выбрать минимальный набор диагностических признаков, удовлетворяющих критериям минимальной стоимости и максимальной информативности проведения проверок, позволяющий на основе измеренных значений принять решение о текущем состоянии биомассы V_x в биореакторе и включающий следующие параметры: концентрация загрязнений в очищенной воде S_{out} , производительность системы по биогазу I_G и содержание метана в выработанном биогазе CH_4 , рабочая температура процесса θ , концентрация летучих жирных кислот VFA, кислотность среды в биореакторе pH, концентрация взвешенных веществ в очищенной воде TSS, производительность системы по сточной воде Q_{in} .

Своевременное принятие решений по управлению технологическим процессом очистки требует анализа ТС в реальном масштабе времени. Однако ввиду особенностей биохимических процессов неизбежным является лабораторный анализ проб, занимающий зачастую продолжительное время и требующий специального оборудования и квалифицированного персонала. В частности, отсутствуют инструментальные методы измерения концентрации летучих жирных кислот [10]. При разработке алгоритмов анализа ТС САБО предлагается использовать алгоритм проведения проверок диагностических признаков, ориентированный на уменьшение лабораторных исследований проб. Алгоритм разработан применительно к САБО согласно методологии [1, 2].

Алгоритм анализа работоспособности анаэробной системы очистки сточных вод. В основу алгоритма анализа ТС САБО с учетом состояния биомассы положено вычисление времени гидравлического пребывания стока на очистке HRT — один из основных показателей эффективности очистки, который нельзя непосредственно измерить, однако можно оценить по наблюдаемым параметрам. При этом расчет может быть проведен несколькими методами, а результат для полностью работоспособной системы без признаков деградации биомассы должен совпадать.

На основе имитационной модели анаэробного биореактора [12] оценивается расчетное время гидравлического пребывания HRT_p с учетом длительности эксплуатации системы после ее запуска.

Время пребывания стока на очистке HRT_{Γ} вычисляется исходя из измерений потерь давления в биореакторе, обеспечиваемого насосным оборудованием, осуществляющим подачу сточной воды в биореактор. Для расчета HRT_{Γ} необходимыми являются измерения расхода сточной воды Q_{in} и давления P_n , нагнетаемого насосным оборудованием.

Текущие измерения начальной концентрации загрязнений в стоке S_{in} , конечной концентрации загрязнений в очищенной воде S_{out} , рабочей температуры θ и кислотности pH в рабочей зоне биореактора дают возможность на основе численного решения математической модели [11] определить время очистки HRT_M .

Приведенные факторы позволяют сформулировать следующий алгоритм анализа работоспособности анаэробной системы очистки сточных вод с выявлением подсистемы, где предполагается отказ, основанной на использовании HRT как основного показателя эффективности анаэробного брожения (рис. 3). Для реализации вычислений должны быть измерены параметры θ , S_{in} , S_{out} , pH, Q_{in} , P_n .

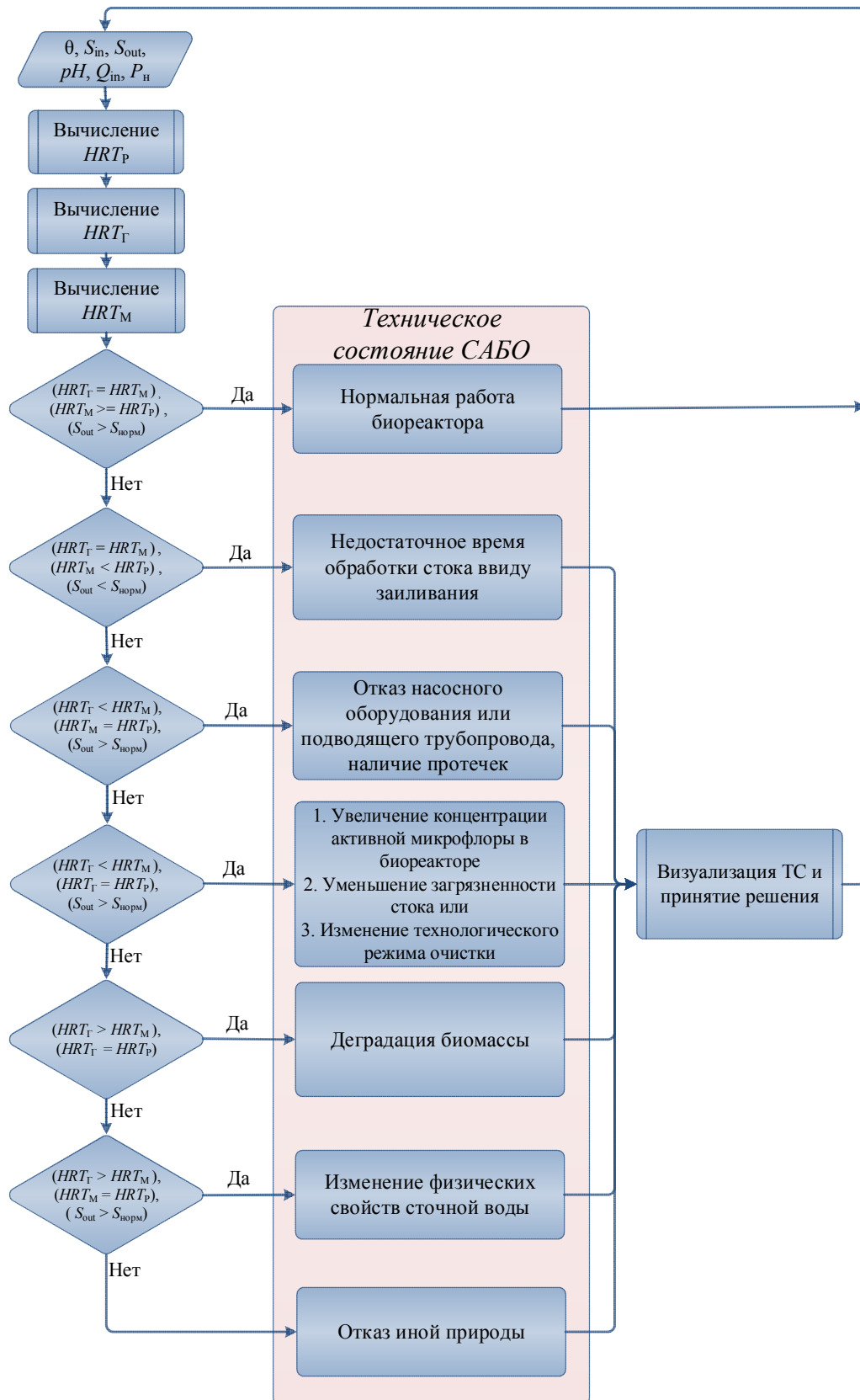


Рис. 3

Предложенный алгоритм отличается от известных тем, что позволяет выявить как неисправности оборудования биореактора, так и процессы жизнедеятельности биомассы, связанные с возможной ее деградацией при эксплуатации анаэробной системы очистки сточных вод

При нарушении условий жизнедеятельности биомассы, вызывающем ее деградацию, необходим лабораторный анализ проб. Для выявления причин угнетения микроорганизмов предлагается использовать гибкий алгоритм проведения проверок диагностических признаков (рис. 4), позволяющий сократить количество проводимых лабораторных исследований.

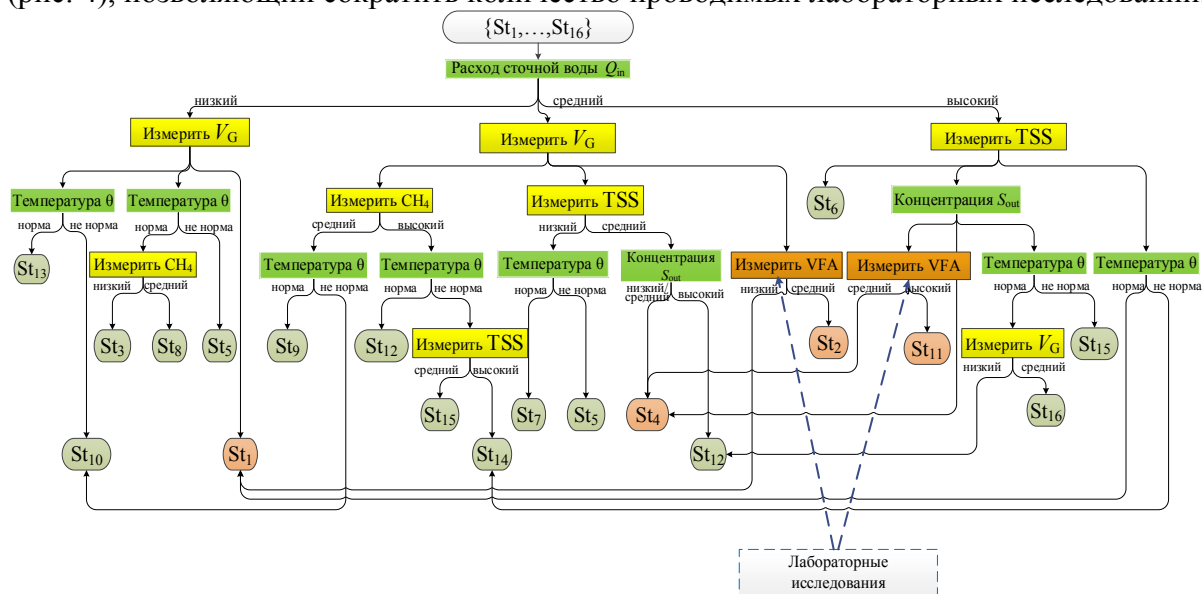


Рис. 4

Как следует из рис. 4, предложенный алгоритм позволяет существенно сократить число проводимых лабораторных исследований.

Выводы. Эксплуатация современных систем анаэробной биологической очистки сточных вод требует непрерывного контроля технического состояния, обеспечивающего безопасность и эффективность очистки. Предложенные в работе алгоритмы анализа технического состояния позволяют выявить неисправности различной природы, в том числе вызывающие деградацию биомассы в биореакторе, и могут быть использованы в автоматизированных системах управления технологическим процессом очистки, при проектировании и выборе технических средств реализации системы мониторинга и поддержки принятия решений при эксплуатации анаэробных систем очистки производственных сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. К., Юсупов Р. М. Идентификация и техническая диагностика. М.: МО СССР, 1987. 521 с.
2. Копкин Е. В., Кравцов А. Н., Мышко В. В. Анализ технического состояния космических средств. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. 190 с.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 408 с.
4. Kazemi P., Bengoa C., Steyer J.-P., Giralt J. Data-driven techniques for fault detection in anaerobic digestion process // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 905—915. DOI: 10.1016/j.psep.2020.12.016.
5. Sánchez-Fernández A., Baldán F. J. J., Sainz-Palmero G. I. I., Benítez J. M. M., Fuente M. J. J. Fault detection based on time series modeling and multivariate statistical process control // Chemometr. Intell. Lab. Syst. 2018. Vol. 182. P. 57—69. DOI:10.1016/j.chemolab.2018.08.003.
6. Lardon L., Punal A., Steyer J.-P. On-line diagnosis and uncertainty management using evidence theory—experimental illustration to anaerobic digestion processes // Journal of Process Control. 2004. Vol. 14. P. 747—763. DOI: 10.1016/j.procont.2003.12.007.
7. Boe K., Batstone D. J., Steyer J.-P., Angelidaki I. State indicators for monitoring the anaerobic digestion process // Water Res. 2010. Vol. 44. P. 5973—5980. DOI:10.1016/j.watres.2010.07.043.

8. Alcaraz-Gonzalez V., Lopez-Banuelos R. H., Steyer J.-P., Mendez-Acosta H. O., Gonzalez-Alvarez V., Pelayo-Ortiz C. Interval-based diagnosis of biological systems — a powerful tool for highly uncertain anaerobic digestion processes // *CLEAN — Soil, Air, Water*. 2012. Vol. 40. P. 941—949. DOI: 10.1002/clen.201100721.
9. Xiao H., Huang D., Pan Y., Liu Y., Song K. Fault diagnosis and prognosis of wastewater processes with incomplete data by the auto-associative neural networks and ARMA model // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 161. P. 96—107. DOI:10.1016/j.chemolab.2016.12.009.
10. Hill A., Tait S., Baillie C., Viridis B., McCabe B. Microbial electrochemical sensors for volatile fatty acid measurement in high strength wastewaters: A review // *Biosensors and Bioelectronics*. 2020. Vol. 165. P. 112409—112420. DOI: 10.1016/j.bios.2020.112409.
11. Ключарёв А. А., Фоменкова А. А. Проектирование секционного анаэробного биореактора // *Изв. Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2018. № 34(60). С. 95—100
12. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021613417. Программный модуль для имитационного моделирования системы анаэробной очистки сточных вод / А. А. Фоменкова, А. А. Ключарёв. № 2021612722, заявл. 09.03.2021.

Сведения об авторе

Анастасия Алексеевна Фоменкова — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Институт вычислительных систем и программирования, кафедра компьютерных технологий и программной инженерии; старший преподаватель; E-mail: a.a.fomenkova@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2021; одобрена после рецензирования 24.11.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Dmitriev A.K., Yusupov R.M. *Identifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika* (Identification and Technical Diagnostics), Moscow, 1987, 521 p. (in Russ.)
2. Kopkin E.V., Kravtsov A.N., Myshko V.V. *Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh sredstv* (Analysis of the Technical Condition of Space Vehicles), St. Petersburg, 2016, 190 p. (in Russ.)
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 408 p. (in Russ.)
4. Kazemi P., Bengoa C., Steyer J.-P., Giral J. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 146, pp. 905–915, DOI:10.1016/j.psep.2020.12.016.
5. Sánchez-Fernández A., Baldán F.J.J., Sainz-Palmero G.I.I., Benítez J.M.M., Fuente M.J.J. *Chemometr. Intell. Lab. Syst.*, 2018, vol. 182, pp. 57–69, DOI:10.1016/j.chemolab.2018.08.003.
6. Lardon L., Punal A., Steyer J.-P. *Journal of Process Control*, 2004, vol. 14, pp. 747–763, DOI: 10.1016/j.jprocont.2003.12.007.
7. Boe K., Batstone D.J., Steyer J.-P., Angelidaki I. *Water Res.*, 2010, vol. 44, pp. 5973–5980, DOI:10.1016/j.watres.2010.07.043.
8. Alcaraz-Gonzalez V., Lopez-Banuelos R.H., Steyer J.-P., Mendez-Acosta H.O., Gonzalez-Alvarez V., Pelayo-Ortiz C. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2012, vol. 40, pp. 941–949, DOI: 10.1002/clen.201100721.
9. Xiao H., Huang D., Pan Y., Liu Y., Song K. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2017, vol. 161, pp. 96–107, DOI:10.1016/j.chemolab.2016.12.009.
10. Hill A., Tait S., Baillie C., Viridis B., McCabe B. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, vol. 165, pp. 112409–112420, DOI: 10.1016/j.bios.2020.112409.
11. Klyucharev A.A., Fomenkova A.A. *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2018, no. 34(60), pp. 95–100. (in Russ.)
12. Certificate on the state registration of the computer programs №2021613417. *Programmnyy modul' dlya imitatsionnogo modelirovaniya sistemy anaerobnoy ochistki stochnykh vod* (Software module for simulation of an anaerobic wastewater treatment system), A.A. Fomenkova, A.A. Klyucharev. Priority 09.03.2021. (in Russ.)

Data on author

Anastasia A. Fomenkova — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Institute of Computational Systems and Programming, Department of Computer Technologies and Software Engineering; Senior Lecturer; E-mail: a.a.fomenkova@mail.ru

The article was submitted 03.11.2021; approved after reviewing 24.11.2021; accepted for publication 30.12.2021.