

УДК 628.356+574.64

**А. В. Игнатенко**

Белорусский государственный технологический университет

**БЕЗРЕАГЕНТНОЕ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ  
И КОНТРОЛЬ БИОБЕЗОПАСНОСТИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

В статье рассмотрена проблема безреагентного обеззараживания осадков сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений канализации и контроля их биологической безопасности. Отмечено, что ОСВ являются биологически опасным отходом очистных сооружений и дальнейшее применение осадков в качестве удобрений возможно только после их обеззараживания. Один из перспективных способов обеззараживания ОСВ – СВЧ обработка.

В работе изучено влияние длительности и мощности СВЧ обработки на снижение общего количества колиформных бактерий (КБ), термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ), численности мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (МАФAnM), яиц гельминтов (ЯГ), а также изменение уровня тепловыделения ( $Q$ ) микроорганизмов в ОСВ.

Установлено, что при удельных энергозатратах 0,1 кВт·ч/кг СВЧ обработка ОСВ обеспечивает снижение содержания санитарно-показательных микроорганизмов и ЯГ до нормируемых значений. Исследование резистентности показателей КБ, ТКБ, МАФAnM,  $Q$ , ЯГ к СВЧ обеззараживанию ОСВ показало, что наиболее устойчивы к СВЧ обработке такие индикаторы биобезопасности ОСВ, как МАФAnM,  $Q$ , ЯГ. Между показателями МАФAnM и  $Q$  существует сильная корреляционная связь, что позволяет использовать биокалориметрию для оценки эффективности обеззараживания и сокращения длительности анализа безопасности ОСВ с 3 сут до 20 мин.

При задаваемом уровне эффективности обеззараживания ОСВ по показателю тепловыделения  $\mathcal{E}_p = 95\%$  обеспечивается гарантированная безопасность ОСВ по показателям КБ, ТКБ, ЯГ. Это уменьшает перечень контролируемых показателей и снижает затраты на контроль биобезопасности ОСВ в лабораториях очистных сооружений.

**Ключевые слова:** осадки сточных вод, СВЧ обработка, обеззараживание, МАФAnM, колиформные бактерии, термотолерантные колиформные бактерии, яйца гельминтов, биокалориметрия, биобезопасность.

**A. V. Ignatenko**

Belarusian State Technological University

**REAGENTLESS DECONTAMINATION  
AND BIOSAFETY CONTROL OF WASTE WATER SEDIMENTS**

In the article it was described a problem of secondary waste water sediments (WWS) decontamination and their biosafety control. It was marked that WWS are the biological danged wastes of sewage treatment plants and the application of non-toxic sediments as fertilizers is possible only after their disinfection. SHF treatment is one of the most promising methods of WWS decontamination to regulatory requirements.

In the work it was studied the influence of time and power SHF treatment at decreasing of a total quantity of coliform bacteria (CB), thermotolerant CB (TCB), mezophylic aerobic and faculty anaerobic microorganizms (MAFAnM), eggs of gelments (EG) and also the level of heat production of microorganisms ( $Q$ ) in WWS.

SHF treatment at specific energy consumption 0.1 kWh/kg decreases a contamination by sanitary-indicative microorganisms and EG to regulatory requirements which allows the use of non-toxic WWS as agricultural fertilizers.

The research of resistivity of such safety indicators as CB, TCB, MAFAnM,  $Q$ , EG showed that the most stable parameters to SHF treatment were MAFAnM,  $Q$ , EG. There is a strong correlation between MAFAnM and  $Q$  parameters that makes it possible to use biocalorimetry for estimation of the decontamination efficiency and reduction in the duration of WWS safety analysis from 3 days to 20 min.

At the level of decontamination effectiveness  $\mathcal{E}_p = 95\%$  it is provided a guaranteed safety on parameters CB, TCB, EG. It decreases a number of used indicators and cost of biosafety control at the laboratories of waste water sewage treatment plants.

**Key words:** waste water sediments, SHF treatment, decontamination, mezophylic aerobic and faculty anaerobic microorganizms, coli forms, thermotolerant coli forms, eggs of gelments, biocalorimetry, biosafety.

**Введение.** ОСВ являются одним из крупнотоннажных отходов очистных сооружений. Ежесуточный объем осадков составляет около 1% от объема очищенных стоков, при этом на долю избыточного активного ила приходится до 60–70% образующихся осадков [1].

ОСВ представляют собой биологически опасные отходы, содержащие широкий спектр патогенных микроорганизмов, паразитов (яиц гельминтов, цист простейших, вирусов и др.). Высокая выживаемость патогенов в окружающей среде создает экологическую опасность для живых организмов, не позволяет непосредственно использовать ОСВ в качестве удобрений и требует их обеззараживания.

Для обработки ОСВ используют реагентные и безреагентные методы. Среди реагентных методов обеззараживания наиболее широко применяется обработка гашеной или негашеной известью, дезинфицирующими веществами [1]. К недостаткам этих методов обеззараживания относится большой расход реагентов, а также их негативное влияние на рост и развитие растений.

Для использования ОСВ в качестве удобрений более перспективно применение безреагентных методов обеззараживания. Однако немногие методы, используемые при обработке воды, подходят для обеззараживания ОСВ. Так, обработка УФ волнами ввиду их низкой проникающей способности не обеспечивает обеззараживания в глубине ОСВ. Более перспективно использование СВЧ волн, обладающих большей проникающей способностью, и позволяющих одновременно проводить обезвоживание и обеззараживание ОСВ.

Для контроля эффективности обеззараживания ОСВ существует целый ряд показателей безопасности, однако не все из них нормируются из-за отсутствия дешевых методов их определения, сложности анализа разных групп патогенов и паразитов. В этой связи в качестве нормируемых показателей используются: содержание яиц гельминтов (ЯГ), мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (МАФАНМ), количество колиформных (КБ), термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ), наличие патогенных микроорганизмов [2, 3].

Основными требованиями биологической безопасности ОСВ являются отсутствие патогенов, ЯГ, при допустимом содержании санитарно-показательных микроорганизмов КБ, ТКБ на уровне  $10^2$ – $10^3$  кл/г [4].

Содержание патогенов на практике определяется редко из-за сложности и длительности контроля низких концентраций данных микроорганизмов. О присутствии патогенов судят по санитарно-показательным микроорганиз-

мам, высокое содержание которых коррелирует с наличием патогенов.

Одной из санитарно-показательных групп микроорганизмов является МАФАНМ, однако их определение методом посева требует 3 сут.

Помимо МАФАНМ, были предложены также и другие санитарно-показательные микроорганизмы: бактерии группы кишечной палочки и сама кишечная палочка *E. coli*. Она является одной из наиболее многочисленных бактерий желудочно-кишечного тракта человека и животных, и ее содержание хорошо коррелирует с количеством патогенов. Однако *E. coli* труднее идентифицировать, поэтому вместо нее предложено использовать показатель КБ и ТКБ. Это позволяет упростить и сократить длительность анализа безопасности ОСВ с 3 до 1 сут.

Для сокращения длительности анализа биобезопасности ОСВ разрабатываются различные инструментальные экспресс-методы. Один из таких методов – биокалориметрия. Она позволяет быстро и точно определять содержание, видовой состав, активность и жизнеспособность микроорганизмов в жидких, твердых и пастообразных средах, а также оценивать влияние на них различных химических и физических факторов [5].

**Основная часть.** Целью данной работы является разработка биокалориметрического метода контроля биобезопасности ОСВ и эффективности их СВЧ обеззараживания.

В работе использовали ОСВ Минской очистной станции с влажностью  $W = 85$ – $99\%$ . Санитарно-микробиологические и паразитологические исследования ОСВ осуществляли в соответствии с источниками [2, 3]. Для паразитологических исследований ОСВ с  $W = 97$ – $99\%$  предварительно обезвоживали центрифугированием 5 мин при 1000 об./мин. Из подготовленных проб ОСВ выделяли ЯГ и анализировали их содержание и жизнеспособность по методу Н. А. Романенко [3]. Микроскопирование и подсчет ЯГ в образцах с учетом их жизнеспособности проводили с помощью светового микроскопа БИМАН Р11:

$$C_{\text{яг}} = k \cdot N / V, \quad (1)$$

где  $k$  – доля жизнеспособных ЯГ;  $N$  – число ЯГ;  $V$  – объем осадка,  $\text{дм}^3$ .

Для санитарно-микробиологических исследований использовали метод десятикратных разведений образцов в физиологическом растворе (ФР). Последние разведения высевали в питательный агар методом глубинного посева. Образцы выдерживали в термостате при  $30^\circ\text{C}$  в течение 3 сут. Содержание МАФАНМ ( $N_m$ ) в ОСВ находили в соответствии с уравнением

$$N_m = a \cdot 10^f \cdot V / v \cdot m, \quad (2)$$

где  $a$  – среднее количество выросших колоний;  $V$  – объем ФР с ОСВ массой  $m$ ;  $v$  – объем посева на питательную среду;  $f$  – степень разведения образцов.

Для определения КБ и ТКБ проводили высеив разведений на среду Эндо. Посевы инкубировали при  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$  (КБ) и при  $(44 \pm 1)^\circ\text{C}$  (ТКБ) в течение 24 ч и подсчитывали число лактозо (+) и оксидазо (+) колоний.

СВЧ обеззараживание ОСВ проводили в СВЧ печи Samsung SE935GR ( $f = 2450$  МГц,  $p = 180\text{--}900$  Вт,  $t = 0, 15$  с; 30 с; 60 с; 120 с;  $m = 25\text{--}150$  г).

Эффективность антимикробной обработки ОСВ определяли по формуле

$$\mathcal{E}_p = (1 - P_t / P_0) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $P_0, P_t$  – показатели содержания или мощности тепловыделения микроорганизмов [5] до и после обеззараживания, соответственно.

Эффективность антипаразитарной обработки ОСВ оценивали процентным содержанием живых ( $N_{ж}$ ) и погибших ( $N_{п}$ ) паразитов:

$$\mathcal{E}_n = N_{п} / (N_{п} + N_{ж}) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Константы деконтаминации ОСВ ( $k_d$ ) при СВЧ обработке определяли как

$$k_d = \ln(N_t / N_0) / P \cdot t, \quad (5)$$

где  $P, t$  – удельная мощность ( $p / m$ ) и время СВЧ обработки;  $N_0, N_t$  – начальное и конечное содержание микроорганизмов или ЯГ.

Полученные данные обрабатывали статистически, используя программное обеспечение Microsoft Excel.

На рис. 1 приведены результаты анализа влияния времени СВЧ обработки на тепловыделение микроорганизмов ОСВ.

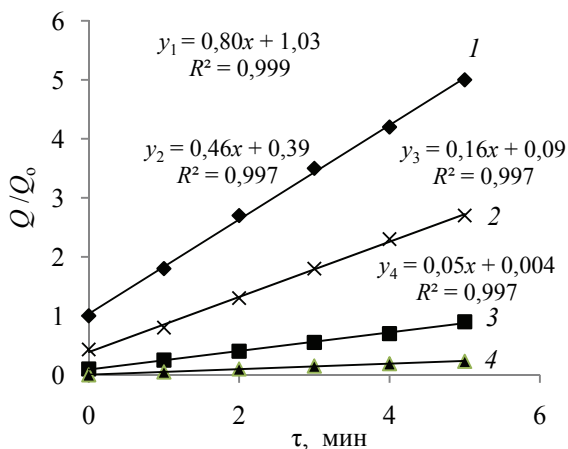


Рис. 1. Кинетика тепловыделения микроорганизмов от времени СВЧ обработки ОСВ: 1 – контроль; 2, 3, 4 – после СВЧ обработки ( $p = 360$  Вт),  $t = 15, 30, 60$  с

Снижение мощности тепловыделения микроорганизмов ОСВ, определяемой тангенсом угла наклона зависимости  $Q / Q_0$  от  $t$  (рис. 1), указывает на гибель клеток после СВЧ обработки в течение десятков секунд. Это позволяет быстро обеззараживать ОСВ в потоке.

Эффективность деконтаминации ОСВ, помимо времени обработки, также зависит от удельной мощности СВЧ излучения (рис. 2).

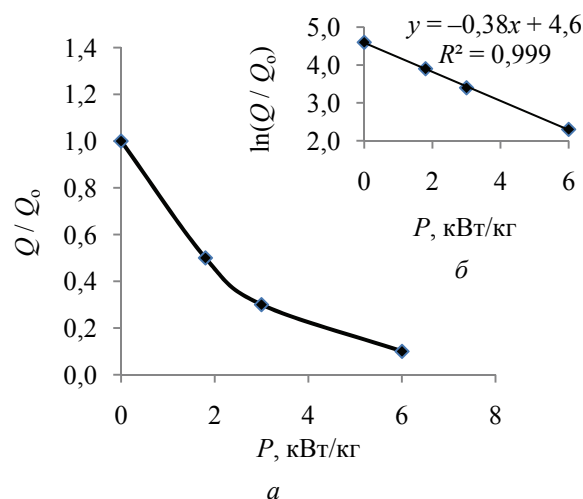


Рис. 2. Изменение относительной величины тепловыделения микроорганизмов от удельной мощности СВЧ обработки ОСВ в обычных (а) и полулогарифмических (б) координатах,  $t = 60$  с

Полученные данные указывают, что изменение уровня тепловыделения микроорганизмов в ОСВ в зависимости от удельной мощности и времени СВЧ обработки описывается уравнением

$$Q_t = Q_0 \cdot \exp(-k \cdot P \cdot t). \quad (6)$$

Это позволяет определить константы гибели отдельных групп микроорганизмов и сравнить резистентность показателей безопасности ОСВ при СВЧ обработке (рис. 3).

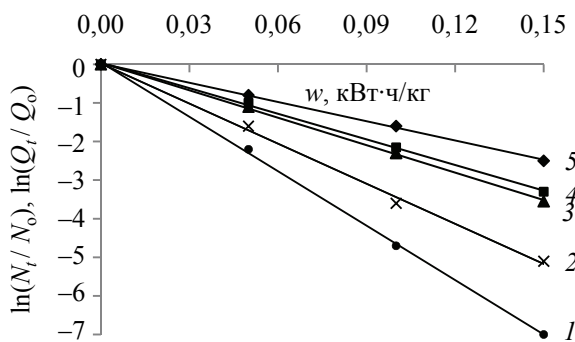


Рис. 3. Изменение показателей безопасности ОСВ от удельных энергозатрат СВЧ обработки в полулогарифмических координатах: 1 – КБ; 2 – ТКБ; 3 – МАФАНМ; 4 –  $Q$ ; 5 – ЯГ

Анализ резистентности различных групп микроорганизмов к СВЧ обеззараживанию показал, что из изученных индикаторов биобезопасности ОСВ (КБ, ТКБ, МАФАНМ, ЯГ) наиболее чувствителен к СВЧ обработке КБ, наиболее устойчивы – показатели ЯГ и МАФАНМ.

Между показателями МАФАНМ и  $Q$  существует сильная корреляционная связь. Это позволяет сократить длительность анализа безопасности ОСВ до 20 мин при использовании вместо показателя МАФАНМ быстро и точно контролируемого показателя  $Q$ .

**Заключение.** В работе проведено исследование СВЧ обеззараживания ОСВ. Установлено, что при удельных энергозатратах 0,1 кВт·ч/кг снижается содержание санитарно-показательных микроорганизмов и ЯГ до нормируемых значений. Это позволяет использовать нетоксичные ОСВ в качестве сельскохозяйственных удобрений.

Для экспресс-контроля биобезопасности ОСВ использован биокалориметрический метод анализа. Показано, что изменение уровня тепловыделения микроорганизмов в ОСВ в зависимости от удельной мощности СВЧ обработки носит экспоненциальный характер и хорошо коррелирует с изменением показателя МАФАНМ. Это позволяет сократить трудоемкость и длительность анализов биобезопасности ОСВ с 3 сут до 20 мин.

При задаваемом уровне безопасности ОСВ по показателю тепловыделения  $\mathcal{E}_p = 95\%$  обеспечивается гарантированное обеззараживание ОСВ по показателям КБ, ТКБ, ЯГ. Это уменьшает перечень анализируемых показателей, снижает затраты на контроль и позволяет использовать биокалориметрию для быстрой и точной оценки биобезопасности ОСВ в лабораториях очистных сооружений.

### Литература

1. Прикладная эковиотехнология: учеб. пособие: в 2 т. / А. Е. Кузнецов [и др.]. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. Т. 1. 629 с.; т. 2. 485 с.
2. МУК 4.2.1884-04. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. М.: Стандартинформ, 2010. 41 с.
3. МУК 4.2.796-99. Методы санитарно-паразитологических исследований (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.12.1999). М.: Стандартинформ, 2000. 36 с.
4. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: Стандартинформ, 2008. 5 с.
5. Игнатенко А. В., Гриц Н. В. Микробиологические, органолептические и визуальные методы контроля качества пищевых товаров. Микрокалориметрия: лаб. практикум. Минск: БГТУ, 2003. 114 с.

### References

1. Kuznetsov A. E., Gradova N. B., Lushnikov S. V., Engel'khart M., Vaysser T., Chebotareva M. V. *Prikladnaya ekoviotekhnologiya: v 2 t.* [Applied Ecobiotechnology: in 2 vol.]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2010. Vol. 1. 629 p.; vol. 2. 485 p.
2. MUK 4.2.1884-04. Method of measurement Biological and microbiological factors. Sanitary-microbiological and sanitary-parazitological analyses of ground water objects. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 41 p. (In Russian).
3. MUK 4.2.796-99. Methods of sanitary-parazitological research. Moscow, Standartinform Publ., 1999. 36 p. (In Russian).
4. GOST R 17.4.3.07-2001. Nature protection. Soils. Requirements for sewage sludge use for fertilization. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 5 p. (In Russian).
5. Ignatenko A. V., Grits N. V. *Mikrobiologicheskiye, organolepticheskiye i vizual'nyye metody kontrolya kachestva pishchevykh tovarov. Mikrokalorimetriya: lab. praktikum* [Microbiological, organoleptic and visual methods of foodstuffs quality control. Microcalorimetry. Laboratory manual]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 114 p.

### Информация об авторе

**Игнатенко Аркадий Васильевич** – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии и биоэкологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ignatenko\_av@tut.by

### Information about the author

**Ignatenko Arkadiy Vasil'yevich** – PhD (Biology), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Biotechnology and Bioecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatenko\_av@tut.by

Поступила 17.11.2016