

УДК 628.356+574.64

**А. В. Игнатенко**

Белорусский государственный технологический университет

**ДЕКОНТАМИНАЦИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И МЕТОДЫ ЕЕ КОНТРОЛЯ**

В статье рассмотрена проблема обеззараживания осадков городских сточных вод (ОСВ) и контроля их безопасности. Проведена оценка эффективности обеззараживания ОСВ при их CaO и СВЧ обработке с помощью методов определения общего количества колиформных бактерий, термотолерантных колиформных бактерий, мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (МАФАНМ), яиц гельминтов. Показано, что СВЧ обработка ОСВ при удельных энергетических затратах 0,1 кВт · ч/кг снижает содержание санитарно-показательных микроорганизмов, яиц гельминтов до нормируемых значений и позволяет использовать нетоксичные осадки в качестве удобрений. В работе предложен биокалориметрический экспресс-метод оценки обеззараживания осадков сточных вод и определения их безопасности, сокращающий трудоемкость и длительность анализов. Сравнительная оценка эффективности деконтаминации ОСВ при химической и физической обработке показала, что показатель МАФАНМ и тепловыделение клеток хорошо коррелируют между собой. Это позволяет сократить трудоемкость и длительность анализов безопасности осадков сточных вод городских очистных сооружений с 3 сут до 20 мин.

**Ключевые слова:** осадки сточных вод, деконтаминация, химическая обработка CaO, СВЧ обработка, общее содержание микроорганизмов, колиформные бактерии, яйца гельминтов, биокалориметрия.

**A. V. Ignatenko**

Belarusian State Technological University

**SEWAGE SLUDGE DECONTAMINATION AND METHODS OF ITS CONTROL**

In the article it was considered a problem of urban sewage sludge decontamination and methods of its control. It was estimated the efficiency of sludge decontamination under CaO and microwave treatment on the base of determination a total quantity of coliform, thermotolerant coliform bacteria, mesophilic aerobes and facultative anaerobes, helminth eggs. It was shown that the level of sewage sludge decontamination under microwave treatment at specific energy consumption 0.1 kW·h/kg decreased the amount of sanitary indicative microorganisms, helminth eggs till nominative meanings allowing using non-toxic sewage sludge as fertilizers. It was proposed a biocalorimetric express-method for estimation of sewage sludge decontamination that makes it possible to decrease the labor treatment and time of their safety analysis. Comparative estimation of sludge decontamination efficiency showed that MAFANM index and cell's heat production are well correlate between each other. It decreases time of sewage sludge safety analysis from 3 days to 20 min.

**Key words:** wastewater sewage sludge, decontamination, chemical treatment by CaO, microwave treatment, total quantity of microorganisms, coli forms, helminth eggs, biocalorimetry.

**Введение.** Использование осадков сточных вод (ОСВ) является актуальной эколого-биотехнологической задачей. Количество образующихся и накопленных ОСВ постоянно увеличивается. Это ведет к обострению проблем, связанных с их экономически эффективной и экологически безопасной утилизацией.

Существует три основных способа обработки осадков: обезвоживание, стабилизация, обеззараживание. Одним из ключевых процессов обработки ОСВ является обеззараживание, позволяющее обеспечить их безопасность по санитарно-микробиологическим, паразитологическим показателям и возможность дальнейшего использования в качестве удобрений [1].

Эффект обеззараживания ОСВ может быть получен биологическими, химическими и физическими способами, а также их комбинацией. Выбор того или иного способа обеззаражива-

ния ОСВ определяется рядом условий, главными из которых являются вид осадков, их количество, эффективность обеззараживания, возможность дальнейшего применения [1].

Немаловажное значение имеет также контроль биологической безопасности сточных вод и ОСВ. Существующие методы микробиологического и паразитологического анализа [2–4] отличаются высокой длительностью и трудоемкостью, что вызывает необходимость их совершенствования.

**Основная часть.** Цель работы – разработка биокалориметрического экспресс-метода контроля безопасности ОСВ и анализ эффективности их химического и СВЧ обеззараживания.

В работе использовали ОСВ очистных сооружений РУП ЖКХ г. Сморгони.

Санитарно-микробиологические и паразитологические исследования осуществляли в соот-

ветствии с МУК 4.2.1884-04 и МУК 4.2.796-99, определяя количество и жизнеспособность яиц гельминтов (ЯГ) по методу Н. А. Романенко, общее содержание колиформных бактерий (КБ), термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ), МАФАНМ методами посева и культивирования микроорганизмов [2, 3].

Для санитарно-микробиологических исследований готовили десятикратные разведения образцов в физиологическом растворе. При анализе КБ и ТКБ полученные разведения заседали в среду Кесслера с поплавками и инкубировали посева в термостате при  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 24 ч. Из образцов, где было отмечено помутнение, образование кислоты и газа или только помутнение, производили высеив петлей на сектора среды Эндо. Посевы инкубировали при  $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$  в течение 18 ч и подсчитывали число лактозоположительных колоний.

Для идентификации микроорганизмов готовили фиксированные мазки и проводили их микроскопирование, окраску по Граму, оксидазный тест. При его положительном результате проводили посев уколом изолированных колоний с секторов среды Эндо в пробирки со средой Гисса с лактозой при  $(37 \pm 1)$  и  $(44 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ . Просмотр посевов осуществляли через 6 ч.

После идентификации колиформных бактерий вычисляли наиболее вероятное число микроорганизмов КБ и ТКБ [2].

Содержание МАФАНМ в ОСВ определяли высеив разведений на 2%-ный питательный агар с последующим культивированием микроорганизмов в термостате в течение 3 сут при  $30^\circ\text{C}$ , а также биокалориметрическим методом [5].

Обеззараживание ОСВ проводили при их СВЧ и химической обработке СаО.

Для химической обработки к ОСВ влажностью 95% добавляли СаО в концентрации 10–20%, выдерживали образцы в закрытой емкости, регистрируя кинетику их нагревания и охлаждения. После седиментации взвешенных частиц и мембранной фильтрации надосадочной жидкости на фильтрах с диаметром пор 0,45 мкм, промывки их физиологическим раствором определяли содержание микроорганизмов на мембранных фильтрах [2].

СВЧ деконтаминацию ОСВ проводили в закрытой емкости в СВЧ-печи Samsung SE935GR при  $f = 2450$  МГц, мощности 300–900 Вт,  $t = 0$ –1 мин, контролируя температуру ОСВ после СВЧ обработки.

Для измерения тепловых потоков образцов использовали микрокалориметр МКМ-Ц. Подготовку прибора к работе и его градуировку для определения физиологической активности клеток в ОСВ проводили в соответствии с [5]. В качестве контроля служили ОСВ с подавлен-

ным метаболизмом микроорганизмов при термообработке  $100^\circ\text{C}$ , 20 мин.

Образцы ОСВ ( $m = 1$  г) до и после обеззараживания заправляли в рабочие ячейки микрокалориметра и измеряли мощность тепловыделения ( $q$ , мкВт/г) и общее количество выделенного тепла ( $Q$ , мДж/г) при  $30^\circ\text{C}$  в течение 20 мин.

Эффективность обеззараживания ОСВ определяли методом посева микроорганизмов, а также методом биокалориметрии по формуле

$$\mathcal{E}_1 = (1 - P_t / P_o) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $P_o$ ,  $P_t$  – показатели содержания микроорганизмов или средней мощности их тепловыделения до и после обеззараживания соответственно. Константу деконтаминации ( $k_d$ ) находили из зависимости  $\ln(P_t / P_o)$  от дозы обработки ( $D$ ).

Эффективность гибели ЯГ определяли процентным содержанием живых ( $N_{\text{ж}}$ ) и погибших ( $N_{\text{п}}$ ) яиц:

$$\mathcal{E}_2 = N_{\text{п}} / (N_{\text{п}} + N_{\text{ж}}) \cdot 100\%. \quad (2)$$

Полученные данные обрабатывали статистически, используя программное обеспечение Microsoft Excel.

Негашеная известь широко используется для обеззараживания и обезвреживания осадков [1].

В соответствии с уравнением



при гашении 1 моля СаО связывается 1 моль  $\text{H}_2\text{O}$  и выделяется  $Q = 65$  кДж тепла, что позволяет рассчитать необходимое количество СаО.

На рис. 1 приведена кинетика разогрева и остывания ОСВ при обработке СаО. Максимальная температура нагрева образцов изменялась от  $51$  до  $82^\circ\text{C}$  при изменении содержания СаО от 10 до 20%.

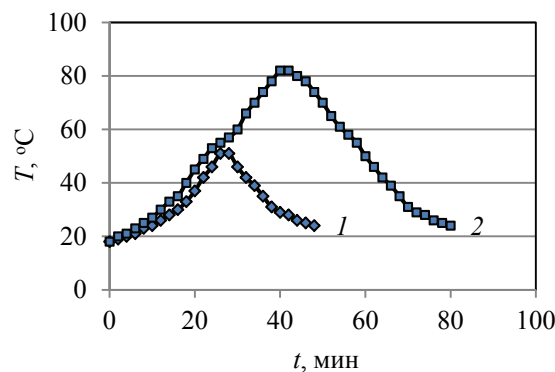


Рис. 1. Кинетика разогрева и остывания ОСВ при обработке СаО: 1 – 10%; 2 – 20%

Основная задача санитарно-микробиологических и паразитологических исследований на городских водоочистных сооружениях – проверка

эффективности очистки и безопасности сточных вод и осадков перед их спуском в водоемы и утилизацией.

В соответствии с НТД для анализа безопасности ОСВ определяли МАФАНМ, КБ, ТКБ и ЯГ [2–4]. Данные показатели характеризуют степень фекального загрязнения ОСВ и являются индикаторами присутствия в них патогенных микроорганизмов, возбудителей бактериальных кишечных инфекций и паразитов.

Основными критериями оценки эффективности деконтаминации ОСВ является содержание КБ, ТКБ и гибель ЯГ, достигаемая при 70°C и выше [4].

Результаты анализа показателей безопасности ОСВ до и после обработки СаО приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты анализа показателей безопасности ОСВ после обработки СаО

Показатели	СаО			$\mathcal{E}_{1,2}$	
	0	15%	20%	15%	20%
КБ, КОЕ/г	7000 ± ± 900	1500 ± ± 300	100 ± 20	78,5	98,5
ТКБ, КОЕ/г	2400 ± ± 600	550 ± ± 100	85 ± 20	77,1	96,4
МАФАНМ, КОЕ/г	(2,2 ± ± 0,3) · 10 <sup>7</sup>	(4,2 ± ± 0,7) · 10 <sup>6</sup>	(1,5 ± ± 0,3) · 10 <sup>6</sup>	80,2	93,8
ЯГ, экз./кг	12 ± 3	3 ± 1	0	75,0	100

Как следует из табл. 1, обработка СаО (15%) не обеспечивает полного обеззараживания ОСВ как по показателям ЯГ, так и КБ, ТКБ. Обработка 20% СаО уничтожает ЯГ, а также снижает показатели колиформных бактерий до нормируемых значений [4].

Одним из перспективных способов деконтаминации ОСВ является СВЧ обработка. В табл. 2 приведена оценка эффективности обеззараживания ОСВ по показателю МАФАНМ.

Таблица 2  
Эффективность СВЧ обеззараживания ОСВ по данным определения МАФАНМ

СВЧ обработка			МАФАНМ, КОЕ/г · 10 <sup>5</sup>	$\mathcal{E}_1$ , %
$P$ , кВт/кг	$t$ , с	$T_{\max}$ , °C		
0	0	20	220 ± 30	–
3	60	60	60 ± 7	72,7
6	60	72	18 ± 3	91,8
9	60	82	5 ± 1	97,7

Как видно из табл. 2, для эффективного СВЧ обеззараживания ОСВ необходимы удельные энергозатраты 0,1 кВт · ч/кг и выше.

Контроль безопасности ОСВ с помощью методов микробиологического анализа отличается значительной длительностью, трудоемкостью, требует дополнительного оборудования и расхода вспомогательных материалов. Для оценки безопас-

ности ОСВ по показателю ЯГ необходимо 6 ч, а по микробиологическим показателям – 3 сут. В этой связи актуален поиск более простых, быстрых и эффективных методов контроля микробиологических и паразитологических показателей ОСВ.

Одним из перспективных методов анализа безопасности ОСВ является биокалориметрия. С энергетической точки зрения мерой жизнеспособности организмов может являться средняя мощность их тепловыделения, которая отражает интенсивность протекающих метаболических процессов в клетках [5].

Для проверки возможности использования биокалориметрии для контроля обеззараживания ОСВ была изучена кинетика тепловыделения образцов от времени их СВЧ обработки (рис. 2).

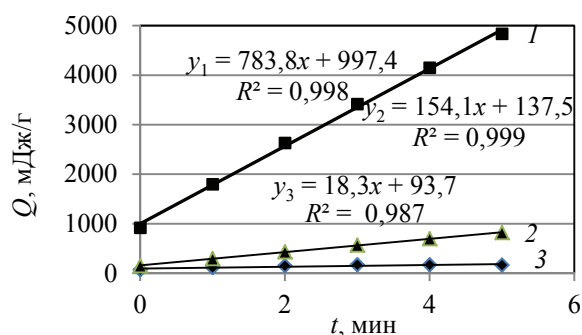


Рис. 2. Кинетика тепловыделения микроорганизмов в ОСВ: 1 – без обработки; 2, 3 – после СВЧ обработки,  $P = 9$  кВт/кг,  $t = 30$  и  $60$  с

Наблюдается снижение уровня тепловыделения ОСВ после их СВЧ обработки, связанное с гибелью микроорганизмов.

На рис. 3 приведен сравнительный анализ кинетики тепловыделения микроорганизмов в ОСВ после их СВЧ и СаО обработки.

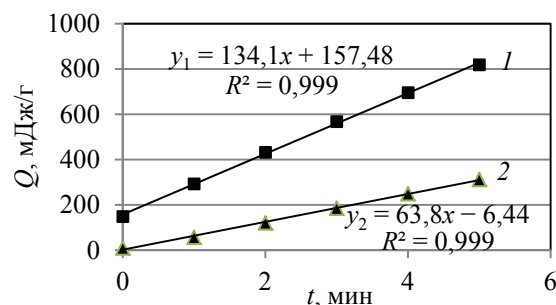


Рис. 3. Кинетика тепловыделения микроорганизмов в ОСВ: 1 – обеззараживание СаО (15%); 2 – СВЧ обеззараживание (6 кВт/кг, 1 мин)

Как видно из рис. 3, уровень тепловыделения клеток в ОСВ после обработки СаО выше, чем после СВЧ воздействия. Эффективность обеззараживания ОСВ 15% СаО по данным биокалориметрии составила  $(82,8 \pm 3,0)\%$ , а СВЧ (6 кВт/кг, 1 мин) –  $(91,8 \pm 2,4)\%$ .

Таблица 3  
Показатели СВЧ обеззараживания ОСВ

Показатели	Средние значения показателей			
	Контроль	После СВЧ обработки, Вт · ч/кг		$k_d$ , отн. ед.
		0,05	0,1	
$q$ , мкВт/г	783 ± 14	232 ± 19	64 ± 2	1,02
МАФАНМ, КОЕ · 10 <sup>5</sup> /г	220 ± 30	60 ± 7	18 ± 3	1,00
КБ, КОЕ · 10 <sup>3</sup> /г	7,0 ± 0,9	1,8 ± 0,3	0,09 ± 0,03	1,78
ТКБ, ОЕ · 10 <sup>3</sup> /г	2,4 ± 0,6	0,7 ± 0,2	0,04 ± 0,02	1,66
ЯГ, экз./кг	12 ± 3	4 ± 1	0	0,88

Между показателями  $q$  и МАФАНМ наблюдается сильная корреляционная связь. Если величину  $k_d$  для показателя МАФАНМ принять за 1,0, то можно отметить, что наибольшую устойчивость к СВЧ обработке проявил показатель ЯГ, наименьшую – КБ (табл. 3).

Полученные результаты указывают на то, что биокалориметрия является быстрым, точ-

ным методом анализа безопасности ОСВ и оценки эффективности их обеззараживания.

**Заключение.** В работе проведен анализ эффективности деконтаминации ОСВ при СВЧ и СаО обработке с помощью методов определения МАФАНМ, КБ, ТКБ и ЯГ. Установлено, что СВЧ обеззараживание ОСВ при удельных энергозатратах 0,1 кВт · ч/кг соответствует химической обработке ОСВ 20% СаО. СВЧ обработка снижает уровень загрязнения ОСВ до нормируемых значений, что позволяет использовать нетоксичные ОСВ в качестве удобрений.

В работе предложен биокалориметрический экспресс-метод оценки степени обеззараживания ОСВ. Сравнительный анализ эффективности деконтаминации ОСВ показал, что показатели МАФАНМ и биокалориметрии хорошо коррелируют между собой. Это позволяет сократить трудоемкость и длительность анализов безопасности ОСВ с 3 сут до 20 мин.

### Литература

1. Пахненко Е. П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения: учеб. пособие. М.: БИНОМ: Лаборатория знаний, 2013. 311 с.
2. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов: МУК 4.2.1884-04: утв. Гл. гос. санит. врачом РФ 03.03.2004. М.: Стандартиформ, 2010. 41 с.
3. Методы санитарно-паразитологических исследований: МУК 4.2.796-99: утв. Гл. гос. санит. врачом РФ 22.12.1999. М.: Стандартиформ, 2000. 36 с.
4. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений: ГОСТ Р 17.4.3.07–2001. Введ. 01.10.2001. М.: Стандартиформ, 2008. 5 с.
5. Игнатенко А. В., Гриц Н. В. Микробиологические, органолептические и визуальные методы контроля качества пищевых товаров. Микрокалориметрия: лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2003. 114 с.

### References

1. Pakhnenko E. P. *Osadki stochnykh vod i drugie netraditsionnye organicheskie udobreniya* [Sewage sludge and other nontraditional organic fertilizers]. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy Publ., 2013. 311 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. *Microbiologicheskie, organolepticheskie i vizualnye metody kontrolya kachestva pishhevych tovarov. Mikrokalorimetriya: laboratorny praktikum* [Microbiological, organoleptic and visual methods of foodstuffs quality control. Microcalorimetry. Laboratory manual]. Minsk, BG TU 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 Vasilevich** – PhD (Biology), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Biotechnology and Bioecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ignatenko\_av@tut.by.

Поступила 18.02.2016