

УДК 504.06:577.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ

А. Ю. Бахарева, А. В. Шестопапов, О. Н. Филенко, Т. С. Тихомирова, О. В. Рыбалова, С. Р. Артемьев, Е. В. Бригада

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ БІОХІМІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ

Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, О. М. Філенко, Т. С. Тихомирова, О. В. Рибалова, С. Р. Артем'єв, О. В. Бригада

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ БИОХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ

A. Bakhareva, O. Shestopalov, O. Filenko, T. Tykhomyrova, O. Rybalova, S. Artemiev, O. Bryhada

Розроблена методика оцінки ефективності систем біоочищення від газоподібних викидів, що містять шкідливі речовини, які розчиняються, не розчиняються у воді, а також забруднень, розчинених у воді. Методика базується на раніше розроблених математичних моделях відповідних нестационарних процесів біоокиснення. На основі аналізу 27 варіантів проектних рішень показані реальні можливості установок біоочищення, оцінено вплив конструктивних і режимних параметрів на ефективність систем біодеструкції метану, сірководню та формальдегіду. Отримані в результаті числових експериментів результати в кількісному відношенні свідчать про необхідність обліку зміни інтенсивності надходження забруднення в процесі заповнення місткості. Встановлено, що збільшення продуктивності установки за об'ємом газоповітряній суміші N викликає зменшення концентрації метану на вході в біореактор і призводить до зменшення ступеня очищення до 62 %. Збільшення інтенсивності надходження сірководню в реактор призводить до зменшення ступеня очищення від 98 до 95 %, а збільшення початкової концентрації біомаси в 1,7 разу викликає зменшення концентрації сірководня у воді з 2,5 до 1,1 г/м³. Спостерігається також значне зменшення середньої питомої біоокиснювальної потужності із зростанням робочого простору, в якому відбувається завершальна стадія процесу очищення викидів від формальдегіду.

Виявлені закономірності є інструментом підвищення якості проектних рішень і зростання ефективності режимів біоокиснення в процесі експлуатації систем біологічної очистки газів

Ключові слова: біологічне очищення викидів, конструктивні і режимні параметри, біореактор, ефективність очищення

1. Введение

Экологическая безопасность крупных городов во многом определяется эффективностью очистки выбросов промышленных и коммунальных предприятий, содержащих метан, сероводород, диоксид серы, аммиак и формальдегид. Физико-химические методы детоксикации этих вредных веществ дорогостоящие и не в полной мере безопасны для компонентов природы.

Экологически безопасным и относительно недорогим методом очистки газообразных выбросов является их биологическая деструкция в биореакторах и специальных очистных установках. Суть метода биологической очистки выбросов заключается в способности микроорганизмов-деструкторов в процессе биохимического окисления разрушать сложные токсичные вещества до простых и безвредных. Практическое внедрение метода биоочистки требует научно обоснованного анализа эффективности установок как объектов проектирования и управления в процессе эксплуатации. Основой методики расчета конструктивных и режимных параметров систем биоочистки соответствующего типа могут стать математические модели биохимической деструкции газообразных выбросов. В то же время, проектирование систем биологической очистки выбросов еще не достаточно распространено из-за отсутствия практических и экспериментальных данных об эффективности таких установок. В отличие от биологических методов очистки сточных вод, достаточно хорошо изученных и широко применяемых в коммунальном хозяйстве, методы биоочистки газовых выбросов еще только начинают развиваться.

Отсутствие сегодня единой методики расчета аппаратов биологической очистки газов, а также недостаточная изученность вопросов влияния проектных и режимных параметров эксплуатации установок на эффективность биохимического окисления определяет актуальность и необходимость дальнейших исследований.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время биологические методы активно развиваются и находят все большее применение для очистки и дезодорации отходящих газов пищевых, биохимических и перерабатывающих производств благодаря высокой эффективности и экономической целесообразности [1]. Для очистки воздуха биологическими методами используются биофильтры, биоскруберы и биореакторы с омываемым слоем [2]. Чаще всего биологический метод детоксикации газообразных выбросов применяется в целях дезодорации и детоксикации воздуха на животноводческих фермах и промышленных

предприятиях от смеси органических веществ относительно невысокой концентрации [4, 5].

Микроорганизмы в аппаратах биологической очистки газов могут также эффективно утилизировать смесь органических и неорганических соединений, таких как аммиак, сероводород, масляную кислоту и этилмеркоптан [6]. Было показано, что при контакте газов в биореакторе в течение 22–34 секунд концентрация загрязнений по этим веществам снижалась соответственно до 3,5–6,5 г·м⁻³·час⁻¹.

Описанные в литературе закономерности разложения сероводорода и метилмеркоптана показывают, что процесс разложения этих веществ зависит от параметров работы биореакторов, таких как толщина биопленки, концентрация веществ в жидкой фазе и максимальный уровень биологического распада [7].

Исследования разложения дисульфида углерода CS₂ в двух орошаемых биофильтрах различной конструкции показали, что на степень деградации загрязнений также влияет конструкция биофильтра и организация режимов смешения с жидкостью [8]. Так, максимальная степень очистки в биофильтрах с нисходящим и переменным потоком составила соответственно 11,6 и 16,6 г·м⁻³·час⁻¹.

Так же описан опыт очистки выбросов биологическими методами от диметилсульфида (с эффективностью до 73 %) и метилмеркаптана (с эффективностью до 87 %) в зависимости от пространственного распределения в колонне орошаемого биофильтра [9].

Авторы публикации [10] рекомендуют использовать биофильтр с сурфоктантом для повышения эффективности очистки газообразных выбросов от стирола.

В [11] показано, что в мембранных биореакторах возможно осуществлять очистку выбросов от устойчивых органических загрязнений с интенсивностью удаления загрязняющих веществ на уровне 200 г·м⁻³·час⁻¹.

Применение биологического метода очистки газообразных выбросов особенно эффективно при низких концентрациях загрязнителей и относительно небольшой производительности, что характерно, в том числе, для сетей водоотведения, таких как метан. Так в [12] описаны закономерности почвенной биофильтрации неприятно пахнущих загрязнений и рассмотрены оптимизирующие факторы процесса, такие как температура, рН среды, концентрации загрязнений и субстрата.

Ряд современных исследований посвящен определению кинетических параметров и математическому описанию процесса биохимической очистки. Так, например, в работе [13] рассмотрены кинетические характеристики процесса деструкции в биопленке аппаратов очистки газов. По результатам производственных данных [14] определены параметры кинетики удаления сероводорода. Выполнены математические описания процессов в орошаемом биофильтре, основанные на статистическом методе оценки экспериментальных данных [15] и на представлении о массопередаче [16, 17].

Каждое в отдельности из известных исследований содержит частные сведения о параметрах конкретных аппаратов в определенных режимах работы.

Исследований, посвященных выявлению закономерностей процесса на основе анализа большого числа вариантов, не обнаружено. Вместе с тем, эффективная реализация процессов биочистки требует знания целостной картины о возможностях установок различного типа в широких диапазонах варьирования конструктивных и режимных параметров. Необходима научно- обоснованная оценка эффективности систем биочистки как объектов проектирования и управления. Такой анализ, ввиду многовариантности и широты диапазонов изменения параметров, может быть выполнен на основе численного эксперимента.

Ранее проведенные экспериментальные исследования позволили выявить закономерности процесса биологической очистки газов и сформировать представления о макрокинетической модели процесса [18]. Были предложены математические модели процессов биохимической деструкции газообразных растворимых [19], нерастворимых [20] и растворенных в воде [21] вредных веществ, а также универсальной модели кинетики стационарного процесса биочистки с субстратным ингибированием [22]. На их основе могут быть разработаны методики расчета конструктивных и режимных параметров собственно систем биочистки соответствующего типа. Кроме того, необходима разработка методики оценки эффективности установок различного типа.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является выявление закономерностей влияния конструктивных и режимных параметров на эффективность установок биологической очистки от газообразных загрязнений растворенных, растворяющихся и не растворяющихся в воде.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику оценки эффективности функционирования систем биочистки от газообразных и растворенных в воде вредных веществ;
- провести численные эксперименты по предложенной методике;
- проанализировать закономерности влияния конструктивных и режимных параметров на эффективность работы биореакторов при деструкции газообразных метана и сероводорода, а также установки биочистки растворенного в воде формальдегида.

4. Методика расчета и оценки эффективности систем биочистки

Методика оценки эффективности базируется на ранее разработанных и реализованных в VBA математических моделях нестационарных процессов биоокисления газообразных вредных веществ растворимых [16] и не растворимых в воде [17], а также загрязнений, растворенных в воде [18]. Математические модели систем биочистки в отличие от математических моделей процессов должны содержать в качестве определяемых не только режимные, но и конструктивные параметры. Связь между конструктивными и режимными параметрами определяется на основе очевидных геометрических и физических соотношений. Для анализа эффективности биодеструкции важно

разделение конструктивных и режимных параметров аппаратов на задаваемые и расчетные. В комплексе набор задаваемых параметров представляет собой проектное решение, требующее оценки его качества на основе набора расчетных показателей. Расчетные показатели могут быть как конструктивными, так и режимными.

Для систем биоочистки газообразного вещества, не растворяющегося в воде, приняты следующие задаваемые проектные параметры:

- интенсивность поступления массы загрязнения в коллектор g_0 ;
- концентрация загрязнения на выходе из биореактора ρ_1 ;
- производительность биореактора по объему газовой смеси N ;
- начальная концентрация биомассы μ_0 ;
- соотношение биомассы и массы загрузки из лавсановых нитей K_M ;
- отношение средней толщины слоя воды, удерживаемой на нитях загрузки, к диаметру нитей K_T .

Оценка эффективности проектного решения производится на основе анализа и сопоставления расчетных проектных параметров.

Рассмотрим случай постоянной интенсивности поступления загрязнения в коллектор g_0 . Тогда концентрация загрязнения в коллекторе, то есть на входе в биореактор ρ_0 , как характеристика начала процесса биоокисления, рассчитывается по формуле:

$$\rho_0 = \frac{g_0}{N}. \quad (1)$$

К расчетным параметрам начала процесса относится также интенсивность поступления объема загрязнения в коллектор:

$$Q = \frac{g_0}{d_r}, \quad (2)$$

где d_r – плотность газообразного вредного вещества (например, для метана 715 г/м³).

Заданное значение концентрации на выходе из биореактора позволяет определить интенсивность выделения вредного вещества в конце процесса биоокисления, которая важна при оценке эффективности работы установки в целом.

Абсолютная и относительная эффективность биочистки в установке оценивается соответственно интенсивностью удаления загрязнения из газовой смеси δg и степенью очистки η . В качестве расчетных проектных параметров оценки интенсивности биоокисления в установке принята средняя удельная (на единицу объема биореактора) биоокислительная мощность W и средняя удельная скорость биоокисления V .

В случае циклического изменения интенсивности поступления загрязнения в коллектор задаются ее меньшие и большие значения – g'_0 и g_0 . Кроме того, появляются дополнительные задаваемые параметры: объем коллектора K ; продолжительности периодов меньшей и большей интенсивностей поступления

загрязнения – T' и T . Устойчивые концентрации вредного вещества в коллекторе для соответствующих периодов ρ_{00} и ρ_{00} определяются по методике, изложенной в [17].

Проектные значения W и V рассчитываются по средним в цикле интенсивностям поступления загрязнения в коллектор g_{0c} и его выделения g_{1c} в конце процесса биоочистки. Максимальная и минимальная интенсивность выделения загрязнения на выходе из биореактора в цикле равны:

$$g'_1 = \rho'_1 N, \quad (3)$$

$$g_1 = \rho_1 N, \quad (4)$$

Максимальная и минимальная в цикле концентрация загрязнения в конце процесса биоочистки ρ_1 и ρ'_1 определяются по модели процесса [17] для начальных значений, приравненных к ρ_{00} и ρ_{00} . Принято линейное изменение концентраций вредного вещества ρ_{1t} и ρ_{1t} во времени.

Если нулевая концентрация не достигается, принимается $\delta T' = \delta T = 0$ и тогда $g'_c = g_c = g_{1c}$. При достижении нулевой концентрации $g_1 = 0$, а $\delta T'$ и δT рассчитываются из этого условия по соотношениям модели системы коллектор-биореактор [17].

Применительно к растворяющемуся в воде загрязнению процесс является нестационарным – в перемещающейся по загрузке воде одновременно происходит биоокисление и непрерывное дополнительное поступление вредного вещества. Такой характер процесса предопределяет возможность достижения до выхода воды из биореактора состояния динамического равновесия с постоянной равновесной концентрацией ρ_p [17]. Принципиальной характеристикой данного процесса биоочистки является ненулевая концентрация загрязнения в отводимой воде.

Для системы биочистки газообразного вещества, растворяющегося в воде, приняты следующие задаваемые проектные параметры:

- интенсивность поступления массы загрязнения в коллектор g_0 ;
- объем пространства биореактора R ;
- интенсивность орошения загрузки водой r ;
- производительность биореактора по объему газовой смеси N ;
- начальная концентрация биомассы μ_0 ;
- соотношение биомассы и массы загрузки из лавсановых нитей K_m ;
- отношение средней толщины слоя воды, удерживающейся на нитях загрузки, к диаметру нитей K_t .

Рассмотрим случай постоянной интенсивности поступления загрязнения в коллектор g_0 . Тогда концентрация загрязнения в коллекторе, то есть в воздухе на входе в биореактор, равна:

$$\rho_0 = \frac{g_0}{N}. \quad (5)$$

К расчетным параметрам, описывающим условия на входе в биореактор, относится также интенсивность поступления объема загрязнения в коллектор Q , рассчитываемая по формуле (2).

В расчетах для сероводорода, диоксида серы и аммиака их плотности d_r приняты равными соответственно 1539, 2927 и 771,4 г/м³.

Основным расчетным проектным параметром, характеризующим собственно процесс биоочистки, является концентрация загрязнения в воде на выходе из биореактора ρ_1 . Методика ее расчета подробнее изложена в [16]. Знание конечной концентрации позволяет определить интенсивность выделения вредного вещества на завершающей стадии процесса биоокисления:

$$g_1 = \rho_1 r. \quad (6)$$

Данный расчетный параметр важен также при оценке эффективности работы установки в целом.

Абсолютная и относительная эффективность биоочистки в установке оценивается соответственно интенсивностью удаления загрязнения δg и степенью очистки η . В качестве расчетных проектных параметров интенсивности биоокисления в установке принята средняя удельная на единицу объема биореактора биоокислительная мощность W и средняя удельная скорость биоокисления V .

Индикативная оценка требуемого для данного процесса уровня абсорбирования определяется параметром:

$$K_p = \frac{Q}{r}, \quad (7)$$

где K_p – требуемая растворимость газообразного вредного вещества в воде, М³_{газа}/М³_{воды}.

В расчетах численных экспериментов была принята цилиндрическая форма биореактора.

Процесс биодеструкции растворенного в воде формальдегида является нестационарным – в нем одновременно происходит биоокисление, непрерывное дополнительное поступление вредного вещества и увеличение объема, в котором происходит биохимическая реакция. Такой характер процесса предопределяет возможность достижения состояния динамического равновесия с постоянной равновесной концентрацией ρ_p и скорости $V_{\rho p}$, определенной по формуле:

$$V_{\rho p} = a \rho_p^b e^{-a \rho_p}. \quad (8)$$

Равновесная концентрация достигается в случае, когда интенсивность поступления загрязнения равна сумме интенсивности биодеструкции и интенсивности, необходимой для компенсации увеличения объема раствора в емкости при постоянной концентрации ρ_p .

Назовем удельной скоростью поступления загрязнения в емкость V_g массу вредного вещества, поступающего в раствор в единицу времени на единицу биомассы:

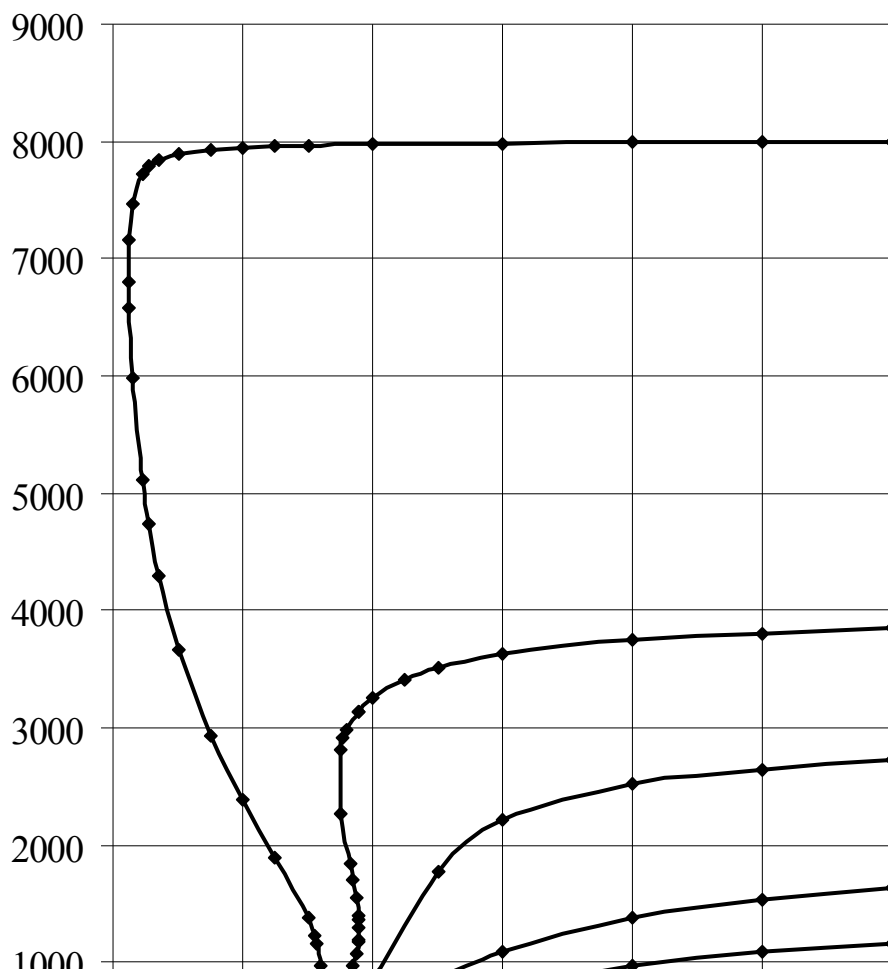
$$V_g = \frac{gr}{m_b}. \quad (9)$$

Тогда значение равновесной концентрации определяется решением нелинейного уравнения:

$$V_{\rho p} = V_g \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_g} \right). \quad (10)$$

На рис. 1 представлена диаграмма равновесных состояний анаэробного процесса биоочистки воды от растворенного в ней формальдегида, рассчитанная по соотношению (10).

ρ_p – равновесная концентрация формальдегида в воде, г/м³



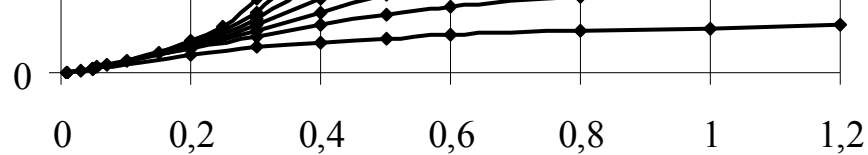


Рис. 1. Характеристика процесса биоочистки при заполнении емкости его раствором в воде: концентрация формальдегида в поступающем растворе для кривых сверху вниз соответственно – $\rho_g=8000; 4000; 3000; 2000; 1500; 1000; 500 \text{ г/м}^3$

Анализ данных рис. 1 свидетельствует о наличии зоны реализации активного нестационарного процесса биоочистки. Эта зона характеризуется достижением равновесных концентраций в емкости ρ_p существенно меньших, чем концентрация поступающего раствора ρ_g . Активный нестационарный процесс осуществляется в области одновременного выполнения соотношений $\rho_g < 3588,7 \text{ г/м}^3$ и $V_g < 0,4044 \text{ г/г} \cdot \text{ч}$. Переход в пассивный режим, характеризующийся примерным равенством ρ_g и ρ_p , возможен в результате резкого увеличения интенсивности поступления водного раствора r при неизменной концентрации в нем формальдегида. Резкое увеличение концентрации водного раствора ρ_g при неизменной удельной скорости поступления загрязнения V_g приведет к переходу на режим с большей равновесной концентрацией ρ_p . Найденные закономерности следует учитывать при выборе проектных параметров установки.

Предпочтительным является активный режим, когда уже на этапе заполнения емкости имеет место существенный эффект биоочистки.

Для установки биохимической очистки от вредного вещества, растворенного в воде, приняты следующие задаваемые проектные параметры:

- интенсивность поступления массы загрязнения в емкость g_j ;
- интенсивность поступления объема водного раствора вредного вещества в емкость r_j ;
- количество биомассы m_b ;
- начальный объем заполнения емкости R_0 ;
- начальная концентрация загрязнения в емкости ρ_0 ;
- продолжительность нестационарной стадии заполнения емкости t_j ;
- концентрация вредного вещества в емкости в момент завершения стационарной стадии процесса биоочистки ρ_k .

Здесь и в дальнейшем индекс нумерует стадию процесса и относится к ее завершению. Равенство $j=k$ соответствует завершению процесса в целом.

Основным расчетным проектным параметром, относящимся к собственно процессу биоочистки, является средняя по объему емкости концентрация загрязнения при завершении каждой нестационарной стадии процесса ρ_j . Методика ее расчета подробнее изложена в [18]. Значение концентрации загрязнения при завершении j -ой стадии представляет собой начальное условие, необходимое для расчета либо последующей нестационарной стадии с другими параметрами, либо завершающего стационарного процесса. Завершение каждой стадии процесса характеризуется своим объемом заполнения емкости

$$R_j = R_0 + \sum r_j t_j \quad (11)$$

и концентрацией биомассы

$$\mu_j = \frac{m_6}{R_j}. \quad (12)$$

В период заполнения емкости в каждой стадии в нее поступает масса вредного вещества, равная

$$\delta G_{ej} = g_j t_j. \quad (13)$$

Суммарная масса вредного вещества, поступившая в емкость в течение всего процесса биоочистки, определяется как

$$G_r = \rho_0 \cdot R_0 + \sum \delta G_{rj}. \quad (14)$$

Важными расчетными параметрами, совместно определяющими возможность реализации активного или пассивного нестационарного процесса, являются удельная скорость поступления загрязнения

$$V_g = \frac{g_j}{m_6} \quad (15)$$

и его концентрация в поступающем растворе

$$\rho_g = \frac{g_j}{r_j}. \quad (16)$$

Объем емкости R , необходимый для осуществления проектируемого процесса биоочистки, относится к параметрам установки и определяется по формуле (11) при $j=k-1$. При этом масса вредного вещества, находящаяся в емкости на момент завершения всего процесса биоочистки, равна:

$$G = \rho_e \cdot R. \quad (17)$$

Абсолютная и относительная эффективность биоочистки в установке оценивается соответственно удаленной массой загрязнения δG_V и степенью очистки η . Очевидно, что общая продолжительность процесса равна:

$$t_i = \sum t_j. \quad (18)$$

В качестве расчетных проектных параметров интенсивности биоокисления в установке приняты: производительность по объему переработанного водного раствора N , средняя удельная на единицу объема емкости биоокислительная мощность W , средняя удельная скорость биоокисления V .

5. Результаты расчетов эффективности проектных решений систем биоочистки

5. 1. Влияние конструктивных и режимных параметров реактора на эффективность процесса биоокисления метана

Влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность работы систем биоочистки оценивалась путем их варьирования по отношению к некоторому базовому проектному решению. Два значения исследуемого параметра задавались как большее и меньшее его базовой величины.

Расчет по метану выполнен для следующих базовых значений: $g_0=100$ г/ч; $R_T=3$ м³; $N=50$ м³/ч; $\mu_0=750$ г/м³; $K_M=0.06$; $K_T=0,1$. Величина K_M задана равной реализованной в эксперименте, а K_M – как возможное реальное значение. Из приведенных результатов расчетов (табл. 1) следует, что при указанных значениях K_M и K_T общий объем биореактора R увеличивается менее чем на два процента. Последнее свидетельствует о небольшой плотности загрузки и, следовательно, о малых потерях давления нагнетаемой газовой смеси.

Таблица 1

Варианты реализации процесса биоокисления метана при постоянной интенсивности его поступления в коллектор

Значение показателя	Вариант расчета					
	1	2	3	4	5	6
Проектные параметры установки						
D – диаметр биореактора, м	1	1	1	1	1	1
H – высота биореактора, м	3,869	3,87	3,87	3,87	3,853	3,887
R – объем биореактора, м ³	3,039	3,039	3,039	3,039	3,026	3,053
R_z – объем загрузки, м ³	0,02713	0,02714	0,02714	0,02714	0,01801	0,03634
m_z – масса загрузки, г	37500	37502	37502	37504	25002	50004
m_b – количество биомассы, г	2250	2250,1	2250,1	2250,3	1500,1	3000,2
δg – интенсивность удаления метана, г/ч	46,95	129,5	95,69	62,49	61,03	92,85
η – степень очистки, %	93,89	64,76	95,69	62,49	61,03	92,85
N – производительность по объему газовой смеси, м ³ /ч	50	50	25	100	50	50
W – средняя удельная	15,45	42,61	31,48	20,56	20,17	30,42

биоокислительная мощность, г/м ³ ч						
W – средняя удельная скорость окисления, г/Г _б ч	0,02086	0,05756	0,04252	0,02777	0,04068	0,03095
Проектные параметры процесса биоочистки						
Q – интенсивность поступления объема метана в коллектор, м ³ /ч	0,07	0,2798	0,1399	0,1399	0,1399	0,1399
g_0 – интенсивность поступления массы метана в коллектор, г/ч	50	200	100	100	100	100
ρ_0 – концентрация метана на входе в биореактор, г/м ³	1	4	4	1	2	2
ρ_1 – концентрация метана на выходе из биореактора, г/м ³	0,0611	1,4097	0,1726	0,3751	0,7795	0,143
g_1 – интенсивность выделения метана на выходе из биореактора, г/ч	3,055	70,49	4,315	37,51	38,98	7,15
t_n – продолжительность процесса биоочистки, ч	0,06	0,06	0,12	0,03	0,06	0,06
μ_0 – начальная концентрация биомассы, Г _б /м ³	750	750	750	750	500	1000

Увеличение интенсивности поступления метана в коллектор (варианты 1 и 2 в табл. 1) приводит одновременно к увеличению его концентрации как на входе в биореактор ρ_0 , так и на выходе из него ρ_1 .

При этом происходит уменьшение степени очистки η и увеличение средней удельной биоокислительной мощности W . Четырехкратное увеличение интенсивности поступления загрязнителя приводит к уменьшению степени очистки от 94 % до 65 %.

Увеличение производительности установки по объему газовой смеси N (варианты 3 и 4 в табл. 1) вызывает уменьшение концентрации метана на входе в биореактор ρ_0 и увеличение на выходе из него ρ_1 . Последнее обстоятельство связано с уменьшением продолжительности процесса биоочистки t_n . В этом случае уменьшается как степень очистки η , так и средняя удельная биоокислительная мощность W . Изменение степени очистки

примерно такое же, как при варьировании интенсивности поступления метана (от 96 % до 62 %).

Увеличение начальной концентрации биомассы μ_0 (варианты 5 и 6 в табл. 1) естественно не влияет на концентрацию метана в коллекторе ρ_0 , но резко уменьшает его концентрацию на выходе из биореактора ρ_1 . Как следствие, имеет место увеличение и степени очистки η и средней удельной биоокислительной мощности W . Двукратное увеличение концентрации биомассы приводит к уменьшению концентрации метана с 0,1 до 0,02 %.

Очевидно, что увеличение объема пространства биореактора, занимаемого газовой смесью R_r , приведет, при прочих равных условиях, к увеличению продолжительности процесса биоочистки t_n , уменьшению концентрации метана на выходе ρ_1 и увеличению степени очистки η .

В табл. 2 представлены результаты расчета суточного цикла изменения интенсивности поступления метана в коллекторы различного объема. Из данных табл. 2 следует, что изменение объема коллектора в диапазоне до 1000 м³ оказывает существенное влияние на степень очистки η и среднюю удельную биоокислительную мощность W . Дальнейшее увеличение объема коллектора не приводит к заметному изменению параметров установки.

Таблица 2

Варианты реализации процесса биоокисления метана при циклической интенсивности его поступления в коллектор

Значение показателя	Вариант расчета		
	1	2	3
Проектные параметры установки			
K – объем коллектора, м ³	100	1000	10000
D – диаметр биореактора, м	1	1	1
H – высота биореактора, м	3,887	3,886	3,886
R – объем биореактора, м ³	3,053	3,052	3,052
R_3 – объем загрузки, м ³	0,03634	0,03634	0,03634
m_3 – масса загрузки, г	50878,1	50878,1	50878,1
m_6 – количество биомассы, г	3052,7	3052,4	3052,4
δg_0 – средняя интенсивность удаления метана, г/ч	79,28	91,95	92,84
η – степень очистки, %	79,28	91,95	92,84
N – производительность по объему газовой смеси, м ³ /ч	50	50	50
W – средняя удельная биоокислительная мощность, г/ м ³ ч	25,97	30,12	30,42
V – средняя удельная скорость окисления, г/ Г ₆ ч	0,02597	0,03012	0,03042
Проектные параметры процесса биоочистки			
Период меньшей интенсивности поступления метана			
Q' – интенсивность поступления объема метана в коллектор, м ³ /ч	0,06996	0,06996	0,06996

g_0 – интенсивность поступления массы метана в коллектор, г/ч	50	50	50
ρ_{iy} – устойчивая концентрация метана на входе в биореактор, г/м ³	1,001	1,636	1,96
T – продолжительность периода, ч	16	16	16
ρ_1 – концентрация метана на выходе из биореактора (минимальная в цикле), г/м ³	0,00097	0,06696	0,1336
g_i – средняя в периоде интенсивность выделения метана на выходе из биореактора, г/ч	20,72	8,049	7,16
Период большей интенсивности поступления метана			
Q – интенсивность поступления объема метана в коллектор, м ³ /ч	0,2798	0,2798	0,2798
g_0 – интенсивность поступления массы метана в коллектор, г/ч	200	200	200
ρ_{oy} – устойчивая концентрация метана на входе в биореактор, г/м ³	3,945	2,415	2,04
T – продолжительность периода, ч	8	8	8
ρ_1 – концентрация метана на выходе из биореактора (максимальная в цикле), г/м ³	0,8278	0,255	0,1528
g_1 – средняя в периоде интенсивность выделения метана на выходе из биореактора, г/ч	20,72	8,049	7,16
$T_{ц}$ – продолжительность цикла, ч	24	24	24
$g_{1с}$ – средняя в цикле интенсивность выделения метана на выходе из биореактора, г/ч	20,72	8,049	7,16
$t_{п}$ – продолжительность процесса биоочистки,	0,06	0,06	0,06
μ_0 – начальная концентрация биомассы, г/м ³	1000	1000	1000

Базисным вариантом для расчетов, приведенных в табл. 2, является вариант 6 табл. 1 для постоянной интенсивности поступления метана в коллектор. Сопоставление результатов расчетов степени очистки η и средней удельной биоокислительной мощности W (табл. 1 вариант 6 и табл. 2 вариант 3) показывает их практическое совпадение.

Таким образом, характерная закономерность собственно процесса биоочистки состоит в нивелировании, при увеличении объема коллектора, разницы между максимальной ρ_1 и минимальной ρ_1 концентрациями метана на выходе из биореактора. На основании изложенного можно утверждать, что увеличение объема коллектора увеличивает инерционность всей системы «коллектор – биореактор». Резкие изменения в интенсивности поступления загрязнения в коллектор, в условиях их циклической повторяемости, не

приводят к существенным изменениям проектных параметров установки и собственно процесса биоочистки при достаточном большом объеме коллектора.

Влияние циклических изменений входных параметров на параметры на выходе в системе «коллектор – биореактор» значительно при относительно небольших объемах коллектора. Необходимость учета изменения интенсивности поступления вредного вещества в коллектор или принятие условия его постоянства определяется на основе анализа конкретных условий проектирования и является элементом проектного решения.

5. 2. Влияние конструктивных и режимных параметров систем биоочистки на эффективность процесса детоксикации сероводорода

В табл. 3, 4 представлены результаты расчетов применительно к сероводороду и следующим базовым значениям: $g_0=5$ г/ч; $R=1$ м³; $r=0,1$ м³/ч; $N=50$ м³/ч; $\mu_0=1000$ г₆/м³; $K_m=0,1$; $K_T=0,1$. Величина K_T задана как возможное реальное значение, а K_m – как близкое к использованному в эксперименте.

Увеличение интенсивности поступления сероводорода в коллектор g_0 (варианты 1 и 2 в табл. 3) приводит одновременно к увеличению его концентрации в воздухе на входе в биореактор ρ_0 и в воде на выходе из него ρ_1 . При этом происходит незначительное уменьшение степени очистки η и увеличение удельной биоокислительной мощности W . Четырехкратное увеличение интенсивности поступления загрязнителя привело к уменьшению степени очистки с 98 % до 95 %.

Увеличение производительности установки по объему газовой смеси N (варианты 3 и 4 в табл. 3) вызывает уменьшение концентрации сероводорода в коллекторе ρ_0 . Остальные параметры остаются неизменными.

Увеличение начальной концентрации биомассы μ_0 (варианты 5 и 6 в табл. 3) не влияет на концентрацию сероводорода в коллекторе ρ_0 , но существенно уменьшает его концентрацию в воде на выходе из биореактора ρ_1 . Вследствие этого наблюдается некоторое увеличение как степени очистки η , так и удельной биоокислительной мощности W . Увеличение начальной концентрации биомассы в 1,7 раза вызывает уменьшение концентрации сероводорода в воде с 2,5 до 1,1 г/м³.

Таблица 3

Варианты реализации процесса биоокисления сероводорода при постоянной интенсивности его поступления в коллектор

Значение показателя	Вариант расчета					
	1	2	3	4	5	6
Проектные параметры установки						
D – диаметр биореактора, м	1	1	1	1	1	1
H – высота биореактора, м	1,273	1,273	1,273	1,273	1,273	1,273
R – объем биореактора, м ³	1	1	1	1	1	1
R_3 – объем загрузки, м ³	0,0071	0,0071	0,0071	0,0071	0,0053	0,0089

	43	43	43	43	57	29
m_3 – масса загрузки, г	10000	10000	10000	10000	7500	12500
m_6 – количество биомассы, г	1000	1000	1000	1000	750	1250
δg – интенсивность удаления сероводорода, г/ч	2,447	9,532	4,843	4,843	4,754	4,889
η – степень очистки, %	97,86	95,32	96,87	96,87	95,08	97,79
N – производительность по объему газовой смеси, м ³ /ч	50	50	25	100	50	50
W – средняя удельная биоокислительная мощность, г/м ³ ч	2,447	9,532	4,843	4,843	4,754	4,889
V – средняя удельная скорость окисления, г/Г ₆ ч	0,0024 47	0,0095 32	0,0048 43	0,0048 43	0,0063 39	0,0039 11
Проектные параметры процесса биоочистки						
Q – интенсивность поступления объема сероводорода в коллектор, м ³ /ч	0,00162 4	0,0064 98	0,0032 49	0,0032 49	0,0032 49	0,0032 49
g_0 – интенсивность поступления массы сероводорода в коллектор, г/ч	2,5	10	5	5	5	5
ρ_0 – концентрация сероводорода на входе в биореактор, г/м ³	0,05	0,2	0,2	0,05	0,1	0,1
ρ_1 – концентрация сероводорода на выходе из биореактора, г/м ³	0,535	4,682	1,567	1,567	2,459	1,107
g_1 – интенсивность выделения сероводорода на выходе из биореактора, г/ч	0,0535	0,4682	0,1567	0,1567	0,2459	0,1107
t_n – продолжительность процесса биоочистки, ч	0,03143	0,0314 3	0,0314 3	0,0314 3	0,0235 7	0,0392 9
μ_0 – начальная концентрация биомассы, Г ₆ /м ³	1000	1000	1000	1000	750	1250
R_v – расчетный объем воды на загрузке, м ³	0,00314 3	0,0031 43	0,0031 43	0,0031 43	0,0023 57	0,0039 29

сероводорода в коллектор, м ³ /ч						
g_0 – интенсивность поступления массы сероводорода в коллектор, г/ч	5	5	5	5	5	5
ρ_0 – концентрация сероводорода на входе в биореактор, г/м ³	0,006498	0,006498	0,006498	0,006498	0,006498	0,006498
ρ_1 – концентрация сероводорода на выходе из биореактора, г/м ³	1,567	1,567	1,567	1,567	4,682	0,535
g_1 – интенсивность выделения сероводорода на выходе из биореактора, г/ч	0,1567	0,1567	0,0784	0,3134	0,4682	0,0535
t_n – продолжительность процесса биоочистки, ч	0,06286	0,01571	0,06286	0,01571	0,01571	0,06286
μ_0 – начальная концентрация биомассы, Гг/м ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000
R_b – расчетный объем воды на загрузке, м ³	0,006286	0,001571	0,003143	0,003143	0,001571	0,006286
r – интенсивность орошения загрузки водой, м ³ /ч	0,1	0,1	0,05	0,2	0,1	0,1
K_p – требуемая растворимость газа в воде, М ³ газа/М ³ воды	0,03249	0,03249	0,06498	0,01624	0,03249	0,03249

Увеличение интенсивности орошения загрузки водой r (варианты 3 и 4 в табл. 4) приводит к увеличению интенсивности выделения сероводорода на выходе из биореактора g_1 и, как следствие, к уменьшению удельной биоокислительной мощности W и степени очистки η (с 98,4 % до 93,7 %).

Увеличение объема биореактора R (варианты 5 и 6 в табл. 4) вызывает уменьшение концентрации сероводорода в воде на выходе из биореактора ρ_1 , сопровождающееся повышением степени очистки η и уменьшением удельной биоокислительной мощности W . В варианте 6 достигнута максимальная степень очистки – 98,9 %.

В качестве свойства биореактора рассматриваемого типа следует отметить принципиальную невозможность достижения нулевой концентрации загрязнения, растворенного в воде, при его концентрации в поступающей газовой смеси не равной нулю.

5. 3. Влияние конструктивных и режимных параметров систем биоочистки на эффективность процесса детоксикации формальдегида

В табл. 5 и 6 представлены результаты расчетов применительно к анаэробному биоокислению формальдегида до полного его удаления. Наблюдаемые эффекты оцениваются при изменении продолжительности заполнения емкости, то есть изменении ее рабочего объема, и изменении интенсивности поступления загрязнения при неизменном начальном количестве биомассы.

Таблица 5

Варианты реализации процесса анаэробного биоокисления формальдегида в воде при постоянной интенсивности его поступления в емкость (проектные параметры установки)

Значение показателя	Вариант расчета		
	1	2	3
D – диаметр емкости, м	3	3,5	4
H – высота емкости, м	0,849	1,143	1,273
R – объем емкости, м ³	6	11	16
R_0 – начальное заполнение, м ³	1	1	1
m_6 – количество биомассы, г	30000	30000	30000
δG_V – удаленная масса формальдегида, г	15000	30000	45000
η – степень очистки, %	100	100	100
t_n – продолжительность процесса биоочистки, ч	6,18	12,16	18,14
N – производительность по объему водного раствора, м ³ /ч	0,8095	0,8225	0,827
W – средняя удельная биоокислительная мощность, г/м ³ ч	404,7	224,3	155,1
V – средняя удельная скорость окисления, г/Г ₆ ч	0,002447	0,009532	0,004843

Таблица 6

Варианты реализации процесса анаэробного биоокисления формальдегида в воде при постоянной интенсивности его поступления в емкость (проектные параметры процесса биоочистки)

Стадия процесса	Начальное состояние – частичное заполнение емкости, формальдегид не поступает	Нестационарный процесс – емкость заполняется, формальдегид поступает с постоянной интенсивностью	Стационарный процесс – емкость заполнена, формальдегид не поступает
-----------------	---	--	---

j – индекс стадии	0			1			2		
Вариант	1	2	3	1	2	3	1	2	3
r_j – интенсивность поступления водного раствора, м ³ /ч	0	0	0	1	1	1	0		
g_j – интенсивность поступления формальдегида, г/ч	0	0	0	300 0	3000	3000	0	0	0
ρ_{gj} – поступающая концентрация формальдегида, г/м ³	0	0	0	300 0	3000	3000	0	0	0
V_{gj} – удельная скорость поступления формальдегида, г/г _б ч	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0
δG_{rj} – поступившая масса формальдегида, кг	0	0	0	15	30	45	0	0	0
t_j – продолительно сть стадии, ч	0	0	0	5	10	15	1,18	2,16	3,14
μ_j – концентрация биомассы, г/м ³	3000 0	3000 0	30000	500 0	2727	1875	5000	272 7	187 5
ρ_j – концентрация формальдегида, г/м ³	0	0	0	95, 5	95,5	95,5	0	0	0

Приведенные данные демонстрируют практически пропорциональное увеличение продолжительности стационарной стадии процесса при увеличении рабочего объема емкости. Этот эффект объясняется соответствующим уменьшением концентрации биомассы и, следовательно, интенсивности стационарного процесса. В целом продолжительности стационарных стадий

относительно невелики, так как во всех вариантах реализуется активный нестационарный процесс с невысокими концентрациями по его завершению.

Следует отметить значительное уменьшение средней удельной биоокислительной мощности с ростом рабочего пространства, в котором происходит завершающая стадия процесса. Это обстоятельство свидетельствует об экономической нецелесообразности нелимитированного увеличения объема емкости. Его величина, при наличии в установке двух емкостей, обеспечивающих технологическую непрерывность, ограничена выполнением соотношения:

$$t_{\zeta} \geq t_o + t_o + t_e, \quad (19)$$

где t_3 – продолжительность заполнения емкости, ч; t_y – продолжительность удаления регенерированной воды из емкости, ч; t_r – продолжительность технического обслуживания емкости, ч; t_k – продолжительность конечной стационарной стадии процесса при заполненной емкости, ч.

Знак равенства в соотношении (19) соответствует минимальному объему, обеспечивающему технологическую непрерывность. Описанная выше закономерность указывает на то, что минимальный объем в этих условиях одновременно будет соответствовать максимальной удельной биоокислительной мощности. Таким образом, расчетный минимальный объем можно считать оптимальным проектным выбором.

В табл. 7, 8 представлены результаты расчетов применительно к анаэробному биоокислению формальдегида для случая двух стадий нестационарного процесса с различной интенсивностью поступления загрязнения в процессе заполнения емкости. Продолжительности стадий приняты равными, задано полное удаление загрязнения при неизменном объеме емкости и начальном количестве биомассы.

Таблица 7

Варианты реализации процесса анаэробного биоокисления формальдегида в воде при изменяющейся интенсивности его поступления в емкость (проектные параметры установки)

Значение показателя	Вариант расчета		
	1	2	3
D – диаметр емкости, м	4,5	4,5	4,5
H – высота емкости, м	1,32	1,32	1,32
R – объем емкости, м ³	21	21	21
R_0 – начальное заполнение, м ³	1	1	1
m_b – количество биомассы, г	10000	10000	10000
δG_V – удаленная масса формальдегида, г	60000	70000	80000
η – степень очистки, %	100	100	100
t_n – продолжительность процесса	38,66	41,37	44,52

биоочистки, ч			
N – производительность по объему водного раствора, м ³ /ч	0,5173	0,4835	0,4493
W – средняя удельная биоокислительная мощность, г/м ³ ч	73,91	80,58	85,58
V – средняя удельная скорость окисления, г/Г _б ч	0,1552	0,1692	0,1797

Таблица 8

Варианты реализации процесса анаэробного биоокисления формальдегида в воде при изменяющейся интенсивности его поступления в емкость (проектные параметры процесса биоочистки)

Стадия процесса	Начальное состояние – частичное заполнение емкости, формальдегид не поступает			Нестационарный процесс – емкость заполняется, формальдегид поступает с j -й постоянной интенсивностью						Стационарный процесс – емкость заполнена, формальдегид не поступает		
	0			1			2			3		
j – индекс стадии												
Вариант	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
r_j , м ³ /ч	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0		
g_j , кг/ч	0	0	0	2	2	2	4	5	6	0	0	0
ρ_{gj} , кг/м ³	0	0	0	2	2	2	4	5	6	0	0	0
V_{gj} , Г/Г _б ч	0	0	0	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	0	0	0
δG_{rj} , кг	0	0	0	20	20	20	40	50	60	0	0	0
t_j , ч	0	0	0	10	10	10	10	10	10	18,66	21,37	24,52
μ_j , Г/м ³	10000	10000	10000	909,1	90,91	909,1	476,2	476,2	476,2	476,2	476,2	476,2
ρ_j , Г/м ³	0	0	0	229,3	22,93	229,3	764,8	1224,8	1796,8	0	0	0

Из приведенных данных следует, что увеличению интенсивности поступления формальдегида во второй стадии соответствует большая продолжительность стационарного процесса. Его величина может превышать продолжительность заполнения емкости. Этот эффект объясняется выходом соотношения параметров ρ_{gj} и V_{gj} за пределы области реализации активного нестационарного процесса и, как следствие, высокими концентрациями загрязнения к моменту заполнения емкости.

Сравнение вариантов с различной интенсивностью поступления формальдегида во второй стадии нестационарного процесса показывает, что увеличению массы загрязнения, поступившей в емкость, соответствует относительно меньшее увеличение общей продолжительности процесса. В результате имеет место заметное увеличение биоокислительной мощности W и уменьшение производительности по переработанному объему водного раствора вредного вещества N .

В целом, полученные результаты в количественном отношении свидетельствуют о необходимости учета изменения интенсивности поступления загрязнения в процессе заполнения емкости.

Важно отметить, что приведенные в табл. 8 проектные варианты не могут быть рекомендованы для реализации из-за невыполнения условия (19). Приемлемое проектное решение в этом случае можно получить путем соответствующего увеличения объема емкости.

Влияние такого интенсифицирующего процесс параметра, как количество биомассы, очевидно. В частности, увеличением начального количества биомассы можно добиться перехода в область активного нестационарного процесса. Таким образом, существует возможность оказывать влияние на характеристики установки биоокисления вредного вещества, растворенного в воде, как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации. На этапе проектирования эффективность установки можно изменять, например, путем выбора объема емкости.

При этом необходимо стремиться к минимальному объему, обеспечивающему соблюдение условия технологической непрерывности. В процессе эксплуатации возможно улучшение характеристик установки за счет изменения начального количества биомассы в период технического обслуживания.

6. Обсуждение результатов исследования влияния конструктивных и режимных параметров на эффективность установок биологической очистки

Приведенные данные результаты расчетов, а также методы изучения влияния конструктивных и режимных параметров могут быть полезны при проектировании систем биологической очистке газа. Преимуществом представленного подхода является простота анализа и экономическая целесообразность численного эксперимента, по сравнению с реальным промышленным экспериментом, требующим создания опытно-промышленной установки и значительных капитальных затрат. Еще одним достоинством предложенного метода является то, что он основывается на математических моделях, созданных с учетом результатов реальных экспериментальных данных и представлениях о кинетике деструкции метана, сероводорода и формальдегида, полученных в лабораторных условиях и описанных ранее в публикациях [18–22].

В целом данные, полученные в результате численного моделирования (табл. 1–8), свидетельствуют о возможности управления характеристиками биореактора как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации.

На этапе проектирования возможность влияния заключается в выборе объема биореактора. Однако следует отметить известную ограниченность такого влияния по экономическим и конструктивным соображениям. Так, при выборе конструктивных параметров систем биоокисления выбросов предпочтительным является биореактор меньших размеров.

При техническом обслуживании принципиально возможно внесение корректив в характеристики биореактора путем изменения начальной концентрации биомассы μ_0 . Возможность оперативного управления биореактором в процессе эксплуатации заключается в изменении концентрации поступающих загрязняющих веществ путем изменения производительности вентилятора N , подающего газоздушную смесь (в случае применения реактора барботажного типа) или интенсивности орошения загрузки водой (в случае применения реактора с омываемым слоем).

Общим же недостатком приведенных исследований является то, что данные математического моделирования могут не учитывать всей специфики процесса в реальных производственных условиях. Поэтому в дальнейшем целесообразно проведение экспериментов в промышленных условиях с использованием опытно-промышленного реактора.

7. Выводы

1. Разработана методика анализа эффективности систем биоочистки как объектов проектирования и эксплуатации. Методика базируется на предложенных математических моделях нестационарных процессов биоокисления газообразных вредных веществ растворимых и не растворимых в воде, а также загрязнений, растворенных в воде.

2. Рассчитано и проанализировано влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность работы систем биодеструкции газообразных метана и сероводорода, а также растворенного в воде формальдегида. Полученные закономерности являются инструментом управления эффективностью при проектировании и эксплуатации установок биоочистки соответствующего типа путем изменения размера биореактора, начальной концентрации биомассы или варьирования технологическими параметрами подачи очищаемого воздуха или промывной жидкости.

3. Полученные в результате численных экспериментов данные в количественном отношении свидетельствуют о необходимости учета изменения интенсивности поступления загрязнения в процессе заполнения емкости. Установлено, что увеличение производительности установки по объему газоздушной смеси N вызывает уменьшение концентрации метана на входе в биореактор и приводит к уменьшению степени очистки до 62 % η . Увеличение интенсивности поступления сероводорода в реактор приводит к уменьшению степени очистки от 98 до 95 %, а увеличение начальной концентрации биомассы в 1,7 раза вызывает уменьшение концентрации

сероводорода в воде с 2,5 до 1,1 г/м³. Следует также отметить значительное уменьшение средней удельной биоокислительной мощности с ростом рабочего пространства, в котором происходит завершающая стадия процесса очистки выбросов от формальдегида.

Литература

1. Kennes, C. Bioprocesses for air pollution control [Text] / C. Kennes, E. R. Rene, M. C. Veiga // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2009. – Vol. 84, Issue 10. – P. 1419–1436. doi: 10.1002/jctb.2216
2. Шестопалов, О. В. Аналіз існуючих процесів та апаратів біологічної очистки газових викидів [Текст] / О. В. Шестопалов, І. В. Пітак // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – Т. 3, № 5 (17). – С. 49–52. doi: 10.15587/2312–8372.2014.25373
3. Seedorf, J. Biological exhaust air treatment systems as a potential microbial risk for farm animals assessed with a computer simulation [Text] / J. Seedorf // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2013. – Vol. 93, Issue 12. – Pp: 3129–3132
4. Reza Iranpour, Huub H.J. Cox, Marc A. (2005). Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 24 (3), 254–267.
5. Estrada, J. M., Bernal, O. I., Flickinger, M. C., Muñoz, R., Deshusses, M. A. (2014) Biocatalytic coatings for air pollution control: A proof of concept study on VOC biodegradation *Biotechnology and Bioengineering*, 112 (2), 263–271 doi: 10.1002/bit.25353
6. Hernández, J., Dorado, A. D., Lafuente, J., Gamisans, X., Prado, Ó. J. and Gabriel, D. (2016), Characterization and evaluation of poplar and pine wood in twin biotrickling filters treating a mixture of NH₃, H₂S, butyric acid, and ethylmercaptan. *Environ. Prog. Sustainable Energy*. doi:10.1002/ep.12491
7. Liu, D. Modeling removal of volatile sulfur compounds in a full-scale biological air filter [Text] / D. Liu, A. Feilberg, M. J. Hansen, C. L. Pedersen, A. M. // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2015. doi: 10.1002/jctb.4696
8. Rojo, N. Carbon disulfide biofiltration: Influence of the accumulation of biodegradation products on biomass development [Text] / N. Rojo, R. Muñoz, G. Gallastegui, A. Barona, L. Gurtubay, F. X. Prenafeta–Boldú, A. Elías // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2012. – Vol. 87, Issue 6. – P. 764–771. doi: 10.1002/jctb.3743
9. Malhautier, L. Treatment of complex gaseous emissions emitted by a rendering facility using a semi-industrial biofilter [Text] / L. Malhautier, S. Cariou, P. Legrand, E. Touraud, P. Geiger, J. L. Fanlo // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2014. doi: 10.1002/jctb.4593
10. Song, T. Effect of surfactant on styrene removal from waste gas streams in biotrickling filters [Text] / T. Song, C. Yang, G. Zeng, G. Yu, C. Xu // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2012. – Vol. 87, Issue 6. – P. 785–790. . doi: 10.1002/jctb.3717

11. Álvarez-Hornos, F. J. Removal of ethyl acetate, n-hexane and toluene from waste air in a membrane bioreactor under continuous and intermittent feeding conditions [Text] / F. J. Álvarez-Hornos, D. Volckaert, P. M. Heynderickx, H. V. Langenhove // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – 2012. – Vol. 87, Issue 6. – P. 739–745. doi: [10.1002/jctb.3734](https://doi.org/10.1002/jctb.3734)
12. Nelson, M., Bohn, H. L. (2011). Soil-Based Biofiltration for Air Purification: Potentials for Environmental and Space Life Support Application. *JEP*, 2 (8), 1084–1094. doi: [10.4236/jep.2011.28125](https://doi.org/10.4236/jep.2011.28125)
13. González-Sánchez, A. Kinetic Characterization by Respirometry of Volatile Organic Compound-Degrading Biofilms from Gas-Phase Biological Filters [Text] / A. González-Sánchez, L. Arellano-García, W. Bonilla-Blancas, G. Baquerizo, S. Hernández, D. Gabriel, S. Revah // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2014. – Vol. 53, Issue 50. – P. 19405–19415. doi: [10.1021/ie503327f](https://doi.org/10.1021/ie503327f)
14. Shareefdeen, Z. Hydrogen Sulphide Removal Using a Novel Biofilter Media [Text] / Z. Shareefdeen, A. Aidan, W. Ahmed, M. B. Khatri, M. Islam, R. Lecheheb, F. Shams // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 62. – P. 13–16.
15. Shareefdeen, Z. Kinetics and Modeling of H₂S Removal in a Novel Biofilter [Text] / Z. Shareefdeen, A. Aidan, W. Ahmed // *Advances in Chemical Engineering and Science*. – 2011. – Vol. 1, Issue 2. – P. 72–76. doi: [10.4236/aces.2011.12012](https://doi.org/10.4236/aces.2011.12012)
16. Bonilla-Blancas, W. Application of a novel respirometric methodology to characterize mass transfer and activity of H₂S-oxidizing biofilms in biotrickling filter beds [Text] / W. Bonilla-Blancas, M. Mora, S. Revah, J. A. Baeza, J. Lafuente, X. Gamisans et. al. // *Biochemical Engineering Journal*. – 2015. – Vol. 99. – P. 24–34 doi: [10.1016/j.bej.2015.02.030](https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.02.030)
17. Ahmed W, Shareefdeen ZM, Jabbar NA (2014) Dynamic modeling and analysis of biotrickling filters in continuous operation for H₂S removal. *Clean Technol Environ Policy* 16:1757–1765
18. Бахарєва Г. Ю. Розробка макрокінетичної моделі процесу біологічної очистки газоповітряних сумішей [Текст] / Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, Є. О. Семенов, Н. О. Букатенко // *ScienceRise*. – 2015. – Т. 2, № 2 (7) – С. 12–15. doi: [10.15587/2313-8416.2015.37057](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.37057).
19. Бахарєва Г. Ю. Розробка математичної моделі процесу біологічної очистки газоподібних викидів. / Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, О. М. Філенко, Т. С. Тихомирова // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – Харків: Технологічний центр. – 2015. – 6 / 6 (78). – С.53–61.
20. Bakhareva A. Development of the mathematical model of the biotreatment process of water-soluble gaseous emissions / A. Bakhareva, O. Shestopalov O. Filenko, T. Novozhylova, B. Kobilyansky // *Eastern-European of Enterprise Technologies*. – Kharkov: Technological centre. – 2017. – 2 / 6 (86). – P.56–62.
21. Бахарєва Г. Ю. Розробка математичної моделі процесу біологічної очистки газоподібних викидів від формальдегіду / Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, О. М. Філенко, Т. С. Тихомирова // *Східно-Європейський журнал*

передових технологій. – Харків: Технологічний центр. – 2016. – 1 / 10 (79). – С.4–10.

22. Бахарєва Г. Ю. Разработка универсальной модели кинетики стационарного процесса биоочистки с субстратным ингибированием / Г.Ю. Бахарєва, О.В. Шестопалов, О.М. Філенко // Східно-Європейський журнал передових технологій.. – 2016. – Т. 2, № 10(80). – С. 19-26.

References

1. Kennes, C., Rene, E. R., Veiga, M. C. (2009). Bioprocesses for air pollution control. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84 (10), 1419–1436. doi: 10.1002/jctb.2216

2. Shestopalov O. V., Pitak I. V. (2014). Analysis of existent processes and devices of bioscrubbing gas emissions. *Technology audit and production reserves*, 3.5, 49–52. doi: 10.15587/2312–8372.2014.25373

3. Seedorf, J. (2013) Biological exhaust air treatment systems as a potential microbial risk for farm animals assessed with a computer simulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (12), 3129–3132,

4. Reza Iranpour, Huub H.J. Cox, Marc A. (2005). Literature review of air pollution control biofilters and biotrickling filters for odor and volatile organic compound removal. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 24 (3), 254–267.

5. Estrada, J. M., Bernal, O. I., Flickinger, M. C., Muñoz, R., Deshusses, M. A. (2014) Biocatalytic coatings for air pollution control: A proof of concept study on VOC biodegradation *Biotechnology and Bioengineering*, 112 (2), 263–271 doi: 10.1002/bit.25353

6. Hernández, J., Dorado, A. D., Lafuente, J., Gamisans, X., Prado, Ó. J. and Gabriel, D. (2016), Characterization and evaluation of poplar and pine wood in twin biotrickling filters treating a mixture of NH₃, H₂S, butyric acid, and ethylmercaptan. *Environ. Prog. Sustainable Energy*. doi:10.1002/ep.12491

7. Liu, D., Feilberg, A., Hansen, M. J., Pedersen, C. L., Nielsen, A. M. (2015) Modeling removal of volatile sulfur compounds in a full-scale biological air filter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. doi: 10.1002/jctb.4696

8. Rojo, N., Muñoz, R., Gallastegui, G., Barona, A., Gurtubay, L., Prenafeta-Boldú, F. X., Elías, A. (2012). Carbon disulfide biofiltration: Influence of the accumulation of biodegradation products on biomass development. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 87 (6), 764–771. doi: 10.1002/jctb.3743

9. Malhautier, L., Cariou, S., Legrand, P., Touraud, E., Geiger, P., Fanlo, J. L. (2014). Treatment of complex gaseous emissions emitted by a rendering facility using a semi-industrial biofilter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. – . doi: 10.1002/jctb.4593

10. Song, T., Yang, C., Zeng, G., Yu, G., Xu, C. (2012) Effect of surfactant on styrene removal from waste gas streams in biotrickling filters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 87 (6), 785–790. doi: 10.1002/jctb.3717

11. Álvarez-Hornos, F. J. Removal of ethyl acetate, n-hexane and toluene from waste air in a membrane bioreactor under continuous and intermittent feeding conditions [Text] / F. J. Álvarez-Hornos, D. Volckaert, P. M. Heynderickx, H. V.

Langenhove // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 2012. – Vol. 87, Issue 6. – P. 739–745. doi: 10.1002/jctb.3734

12. Nelson, M., Bohn, H. L. (2011). Soil-Based Biofiltration for Air Purification: Potentials for Environmental and Space Life Support Application. JEP, 2 (8), 1084–1094. doi: 10.4236/jep.2011.28125

13. González-Sánchez, A., Arellano-García, L., Bonilla-Blancas, W., Baquerizo, G., Hernández, S., Gabriel, D., Revah, S. (2014). Kinetic Characterization by Respirometry of Volatile Organic Compound-Degrading Biofilms from Gas-Phase Biological Filters. Industrial & Engineering Chemistry Research, 53 (50), 19405–19415. doi: 10.1021/ie503327f

14. Shareefdeen, Z., Aidan, A., Ahmed, W., Khatri, M. B., Islam, M., Lecheheb, R., Shams, F. (2010). Hydrogen Sulphide Removal Using a Novel Biofilter Media. World Academy of Science, Engineering and Technology, 62, 13–16.

15. Shareefdeen, Z. M., Ahmed, W. & Aidan, A. (2011). Kinetics and Modeling of H₂S Removal in a Novel Biofilter. Advances in Chemical Engineering and Science, 1 (2), 72–76. doi: 10.4236/aces.2011.12012

16. Bonilla-Blancas, W., Mora, M., Revah, S., Baeza, J. A., Lafuente, J., Gamisans, X. et al. (2015). Application of a novel respirometric methodology to characterize mass transfer and activity of H₂S-oxidizing biofilms in biotrickling filter beds. Biochemical Engineering Journal, 99, 24–34. doi: 10.1016/j.bej.2015.02.030

17. Ahmed W, Shareefdeen ZM, Jabbar NA (2014) Dynamic modeling and analysis of biotrickling filters in continuous operation for H₂S removal. Clean Technol Environ Policy 16:1757–1765

18. Бахарєва Г. Ю. Розробка макрокінетичної моделі процесу біологічної очистки газоповітряних сумішей [Текст] / Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, Є. О. Семенов, Н. О. Букатенко // ScienceRise. – 2015. – Т. 2, № 2 (7) – С. 12–15. doi: 10.15587/2313-8416.2015.37057.

19. Бахарєва Г. Ю. Розробка математичної моделі процесу біологічної очистки газоподібних викидів. / Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, О. М. Філенко, Т. С. Тихомирова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр. – 2015. – 6 / 6 (78). – С.53–61.

20. Bakhareva A. Development of the mathematical model of the biotreatment process of water-soluble gaseous emissions / A. Bakhareva, O. Shestopalov O. Filenko, T. Novozhylova, B. Kobilyansky // Eastern-European of Enterprise Technologies. – Kharkov: Technological centre. – 2017. – 2 / 6 (86). – P.56–62.

21. Бахарєва Г. Ю. Розробка математичної моделі процесу біологічної очистки газоподібних викидів від формальдегіду / Г. Ю. Бахарєва, О. В. Шестопапов, О. М. Філенко, Т. С. Тихомирова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технологічний центр. – 2016. – 1 / 10 (79). – С.4–10.

22. Разработка универсальной модели кинетики стационарного процесса биоочистки с субстратным ингибированием / Г.Ю. Бахарєва, О.В.

Шестоपालов, О.М. Філенко // Східно-Європейський журнал передових технологій.. – 2016. – Т. 2, № 10(80). – С. 19-26.

Разработана методика оценки эффективности систем биоочистки от газообразных растворимых и не растворимых в воде вредных веществ, а также загрязнений, растворенных в воде. Методика базируется на ранее разработанных математических моделях соответствующих нестационарных процессов биоокисления. На основе анализа 27 вариантов проектных решений показаны реальные возможности установок биоочистки, оценено влияние конструктивных и режимных параметров на эффективность систем биодеструкции метана, сероводорода и формальдегида. Полученные в результате численных экспериментов результаты в количественном отношении свидетельствуют о необходимости учета изменения интенсивности поступления загрязнения в процессе заполнения емкости. Установлено, что увеличение производительности установки по объему газозооной смеси N вызывает уменьшение концентрации метана на входе в биореактор и приводит к уменьшению степени очистки до 62 %. Увеличение интенсивности поступления сероводорода в реактор приводит к уменьшению степени очистки от 98 до 95 %, а увеличение начальной концентрации биомассы в 1,7 раза вызывает уменьшение концентрации сероводорода в воде с 2,5 до 1,1 г/м³. Наблюдается также значительное уменьшение средней удельной биоокислительной мощности с ростом рабочего пространства, в котором происходит завершающая стадия процесса очистки выбросов от формальдегида.

Выявленные закономерности представляют собой инструмент повышения качества проектных решений и роста эффективности режимов биоокисления в процессе эксплуатации систем биологической очистки газов.

Ключевые слова: биологическая очистка выбросов, конструктивные и режимные параметры, биореактор, эффективность очистки

Бахарева Анна Юрьевна

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра охраны труда и окружающей среды

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002

Количество статей в общегосударственных базах данных – 20

Количество статей в международных базах данных – 10

Контактный тел. 067-90-42-384

E-mail: baharevaann@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-0765-9943>

Шестоपालов Алексей Валерьевич

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра химической техники и промышленной экологии
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002
Количество статей в общегосударственных базах данных – 23
Количество статей в международных базах данных – 8
Контактный тел. 063-61-57-139
E-mail: shestopalov.it@khpi.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-6268-8638>

Филенко Олеся Николаевна
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра химической техники и промышленной экологии
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002
Количество статей в общегосударственных базах данных – 11
Количество статей в международных базах данных – 4
Контактный тел. 099-25-65-163
E-mail: olesya.n.filenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0277-6633>

Тихомирова Татьяна Сергеевна
Кандидат технических наук, старший преподаватель
Кафедра химической техники и промышленной экологии
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002
Количество статей в общегосударственных базах данных – 18
Количество статей в международных базах данных – 2
Контактный тел. 050-6-081-081
E-mail: tatikh@i.ua
<https://orcid.org/0000-0001-9124-9757>

Рыбалова Ольга Владимировна
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности
Национального университета гражданской защиты Украины
ул. Чернишевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023
E-mail: olga.rybalova@nuczu.edu.ua
Контактный тел.: 067-41-747-89
Количество статей в общегосударственных базах данных – 38
Количество статей в международных базах данных – 21
h- индекс – 4
Номер ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8798-4780>

Артемьев Сергей Робленович
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности
Национального университета гражданской защиты Украины
ул. Чернишевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023
E-mail: artemev.1967@nuczu.edu.ua
Контактный тел.: 067-928-75-59
Количество статей в общегосударственных базах данных – 25
Количество статей в международных базах данных – 10
<http://orcid.org/0000-0002-9086-2856>

Бригада Елена Владимировна
Кандидат технических наук, доцент
Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности
Национального университета гражданской защиты Украины
ул. Чернишевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023
E-mail: ebrigada@nuczu.edu.ua
Контактный тел.: +38(050)-8227117
Количество статей в общегосударственных базах данных – 30
Количество статей в международных базах данных – 2
h-индекс – 3
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-8516>

Бахарєва Ганна Юрїївна
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра охорони праці та навколишнього середовища
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 20
Кількість статей у міжнародних базах даних – 10
Контактний тел. 067-90-42-384
E-mail: baharevaann@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-0765-9943>

Шестопапов Олексій Валерійович
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра хімічної техніки та промислової екології
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 23
Кількість статей у міжнародних базах даних – 8
Контактний тел. 063-61-57-139
E-mail: shestopalov.it@khpi.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-6268-8638>

Філенко Олеся Миколаївна
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра хімічної техніки та промислової екології
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 11
Кількість статей у міжнародних базах даних – 4
Контактний тел. 099–25–65–163
E-mail: olesya.n.filenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0277-6633>

Тихомирова Тетяна Сергіївна
Кандидат технічних наук, старший викладач
Кафедра хімічної техніки та промислової екології
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 18
Кількість статей у міжнародних базах даних – 2
Контактний тел. 050-6-081-081
E-mail: tatikh@i.ua
<https://orcid.org/0000-0001-9124-9757>

Рибалова Ольга Володимирівна
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра охорони праці та техногенно-екологічної безпеки
Національного університету цивільного захисту України
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023
E-mail: olga.rybalova@nuczu.edu.ua
Контактний тел. : 067–41–747–89
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 38
Кількість статей у міжнародних базах даних – 21
h-індекс – 4
Номер ORCID: [http:// orcid.org/0000-0002-8798-4780](http://orcid.org/0000-0002-8798-4780)

Артем'єв Сергій Робленович
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра охорони праці та техногенно-екологічної безпеки
Національного університету цивільного захисту України
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023
E-mail: artemev.1967@nuczu.edu.ua
Контактний тел.: 067–928–75–59
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 25
Кількість статей у міжнародних базах даних – 10
<http://orcid.org/0000-0002-9086-2856>

Бригада Олена Володимирівна
Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра охорони праці та техногенно-екологічної безпеки
Національного університету цивільного захисту України
вул. Чернишевська, 94, м. Харьков, Україна, 61023
E-mail: ebrigada@nuczu.edu.ua
Контактний тел.: +38(050)-8227117
Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 30
Кількість статей у міжнародних базах даних – 2
h-індекс – 3
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-8516>

Bakhareva Anna
PhD, Associate Professor
Department of occupational safety and environmental
National technical university «Kharkiv polytechnic institute»
Курьчова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
The number of articles in national databases – 20
The number of articles in international databases – 10
Contact tel. 067-90-42-384
E-mail: baharevaann@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-0765-9943>

Shestopalov Oleksii
PhD, Associate Professor
Department of chemical technique and industrial ecology
National technical university «Kharkiv polytechnic institute»
Курьчова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
The number of articles in national databases – 23
The number of articles in international databases – 8
Contact tel. 063-61-57-139
E-mail: shestopalov.it@khpi.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0001-6268-8638>

Filenko Olesya
Candidate of engineering sciences (PhD), associate professor
Department of chemical technique and industrial ecology
National technical university «Kharkov polytechnic institute»
Курьчова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
The number of articles in national databases – 11
The number of articles in international databases – 4
Contact tel. 099–25–65–163
E-mail: olesya.n.filenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0277-6633>

Tetyana Tykhomyrova
PhD, Senior Lecturer
Department of chemical technique and industrial ecology
National technical university «Kharkov polytechnic institute»
Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Contact tel. 050-6-081-081
E-mail: tatikh@i.ua
The number of articles in national databases – 118
The number of articles in international databases – 2
<https://orcid.org/0000-0001-9124-9757>

Rybalova Olga
PhD, Associate Professor
Department of Labour Protection and technogenic and ecological safety
National University of Civil Defence of Ukraine
Chernyshevskaya str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023
E-mail: olga.rybalova@nuczu.edu.ua
Contact tel. : 067-41-747-89
The number of articles in national databases – 38
The number of articles in international databases – 21
h – index – 4
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8798-4780>

Artemiev Sergey
PhD, Associate Professor
Department of Labour Protection and technogenic and ecological safety
National University of Civil Defence of Ukraine
Chernyshevskaya str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023
E-mail: artemiev.1967@nuczu.edu.ua
Contact tel.: 067-928-75-59
The number of articles in national databases – 25
The number of articles in international databases – 10
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9086-2856>

Bryhada Olena
PhD, Associate Professor
Department of Labour Protection and technogenic and ecological safety
National University of Civil Protection of Ukraine
Chernyshevskaya str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023
E-mail: ebrigada@nuczu.edu.ua
Contact tel.: +38(050)-8227117
The number of articles in national databases – 30
The number of articles in international databases – 2
h-index – 3

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-8516>