

УДК 628.543

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В. В. Мороз¹, В. В. Ивашечкин², Е. А. Урецкий³

¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru

² Д. т. н., профессор кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ivashechkin_vlad@mail.ru

³ Компетентный внешний представитель Корпорации Hoffland Environmental Inc. (USA) 10391 Silver Springs Road Conroe, TX 77303, Environmental technology and equipment, Бумбск, Беларусь, e-mail: euretsky@yandex.by

Реферат

Решающим процессом, от которого зависит эффективность очистки сточной воды, обработанной минеральными и органическими реагентами, является процесс хлопьеобразования. В связи с этим были проведены соответствующие теоретические исследования, результаты которых были использованы для проектирования реакторных узлов.

Для выбора оптимальных технологических условий и расчета производительности химических реакторов в зависимости от состава и количества обрабатываемых сточных вод, а также технологических режимов процесса, необходимо применять единую методику.

Перемешивание приводит к неравномерному движению отдельных объемов воды, появлению макро- и микровихрей, на границе которых происходит градиентная коагуляция. Для образования крупных хлопьев необходимо создать условия, способствующие градиентной коагуляции. Наряду с этим, вихревые потоки, создавая неравномерные напряжения, разрывают рыхлые первичные структуры и способствуют образованию более компактных, хорошо сформированных хлопьев. Конечный размер хлопьев зависит от соотношения скорости обоих происходящих при перемешивании процессов. На величину хлопьев влияет интенсивность перемешивания, его продолжительность и величина сил адгезии, удерживающих частицы связанными между собой.

В условиях очистки сточных вод, когда концентрация загрязнений и величина pH среды колеблются в довольно широких пределах, найти универсальный параметр, обеспечивающий стабильный процесс хлопьеобразования, весьма затруднительно. Проведенное исследование выявило, что эффективность осветления сточных вод в широком диапазоне величин pH, оборотов мешалки и состава сточных вод происходит в течение 5–10 минут, в интервалах времени многократно меньших, чем рекомендовано.

В статье приводится формула, которая в значительной мере позволяет избежать ошибок при определении объема и времени пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах различных типов. Предложен и реализован в опытной схеме реакторный узел обработки сточных вод содержащих хром и сточные воды содержащие кислоты и щелочи с элементами системы автоматического регулирования (САР). Приведены исследования на производстве, в результате которых разработаны и внедрены зонированные химические аппараты, позволяющие эффективно использовать стандартное оборудование и отработанные технологические растворы уменьшая экологическое воздействие на окружающую среду. Все это позволило сократить до минимума количество технологического оборудования (смесители, реакторы, камеры хлопьеобразования), а также время обработки сточных вод в стандартных химических аппаратах с механическими мешалками не менее чем в три раза. Не менее чем вдвое снизить металло- и энергоёмкость, а также уменьшить потребность в производственных площадях для его размещения.

Ключевые слова: аппарат, условия, pH, реактор, раствор, реагент, зона, смешение, вытеснение, поток, структура, осветлитель, камера, насадка, энергопотребление, металлоёмкость.

RESEARCH, DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF EQUIPMENT FOR TREATMENT OF WASTEWATER FROM GALVANIC PRODUCTION

V. V. Moroz, V. V. Ivashechkin, E. A. Uretsky

Abstract

The decisive process on which the efficiency of water purification treated with mineral and organic reagents depends is the flocculation process. In this regard, the corresponding theoretical studies were carried out, the results of which were used to design reactor units.

To select optimal process conditions and calculate the productivity of chemical reactors depending on the composition and amount of treated wastewater, as well as process modes, it is necessary to use a single technique.

Mixing leads to uneven movement of individual volumes of water, the appearance of macro- and microvortices, at the boundary of which gradient coagulation occurs. To form large flocs, it is necessary to create conditions that promote gradient coagulation by mixing the water hydraulically or mechanically. Along with this, vortex flows, creating uneven stresses, break loose primary structures and promote the formation of more compact, well-formed flocs. The final size of the flocs depends on the ratio of the speed of both processes occurring during mixing. The size of the flocs is affected by the intensity of mixing, its duration and the magnitude of the adhesive forces that hold the particles together.

In wastewater treatment, where contaminant concentrations and pH fluctuate widely, finding a universal parameter that ensures stable flocculation is extremely difficult. A study has revealed that wastewater clarification efficiency across a wide range of pH values, mixer speeds, and wastewater composition occurs with in 5–10 minutes, at intervals many times shorter than recommended.

This article presents a formula that significantly reduces errors in determining the volume and residence time of wastewater in various types of automated reactors. A reactor unit for processing wastewater containing chromium and wastewater containing acids and alkalis with elements of an automatic control system (ACS) has been proposed and implemented in a pilot scheme. Industrial research is presented, leading to the development and implementation of zoned chemical apparatuses that enable the efficient use of standard equipment and wastewater solutions, reducing environmental impact. All this has allowed us to minimize the amount of process equipment (mixers, reactors, flocculation chambers), as well as the wastewater treatment time in standard chemical apparatus with mechanical agitators, by at least a factor of three. This has also reduced the metal and energy consumption by at least half, as well as the need for production space.

Keywords: apparatus, conditions, pH, reactor, solution, reagent, zone, mixing, displacement, flow, structure, clarifier, chamber, packing, energy consumption, metal consumption.

Введение

Перемешивание – одна из технологических операций, широко применяемых как в химической промышленности, так и для очистки сточных вод с целью осуществления различных физических процессов, служащая для выравнивания полей концентрации и температур, и зачастую определяющая скорость протекания этих процессов, поскольку в этом случае оказывает влияние не только на скорость процесса, но и на качество очистки.

Для этой цели нашли широкое применение химические аппараты с различными перемешивающими устройствами [1-4].

Основная часть. Исследование реакторного узла обработки сточных вод содержащих хром и сточные воды, содержащие кислоты и щелочи с элементами систем автоматического регулирования

Для выбора оптимальных технологических условий и расчёта производительности химических реакторов в зависимости от состава и количества обрабатываемых сточных вод, а также режимов процесса, необходимо применять разработанный авторами статьи единый подход, основа которого показана на рисунке 1 [5–7; 24, 25].

Использование этой новой методологии позволяет разработать аппаратное оформление промышленного процесса на основе типового аппарата с механической мешалкой, обеспечивающей интенсивное перемешивание сточных вод с реагентами.

Анализ эффективности химических технологий, проводимых в аппаратах с мешалками, при очистке сточных вод показывает, что тех-

нологические возможности таких аппаратов не всегда учитываются и не всегда оптимально используются, что значительно снижает эффективность химического процесса и приводит к необоснованному увеличению числа единиц оборудования в технологической линии. Кроме того, из-за незнания при выборе и расчетах оборудования при реагентной очистке сточных вод часто определяют лишь общий объем химических реакторов, который необходим для обеспечения требуемого времени пребывания потоков химических реагентов и сточных вод заданной производительности [5, 7] (рисунок 1).

Зачастую допускаются ошибки, среди которых можно выделить следующие:

- выбор объема аппарата без учета скорости химических процессов и состояния перемешиваемой среды на микроуровне;
- неэффективное использование гидродинамических условий в стандартном аппарате с мешалкой. Например, в реакторе-вытеснителе предыдущий слой не смешивается с последующим, в то же время в реакторе-смесителе выравнивание концентраций перемешивающихся ингредиентов по объёму происходит практически мгновенно;
- неправильная обвязка химических реакторов технологическими трубопроводами;
- неправильный выбор мест ввода сточных вод и химических реагентов в аппарат;
- размещение чувствительных элементов САР вне активных зон реактора;
- отсутствие учета инерционности САР.

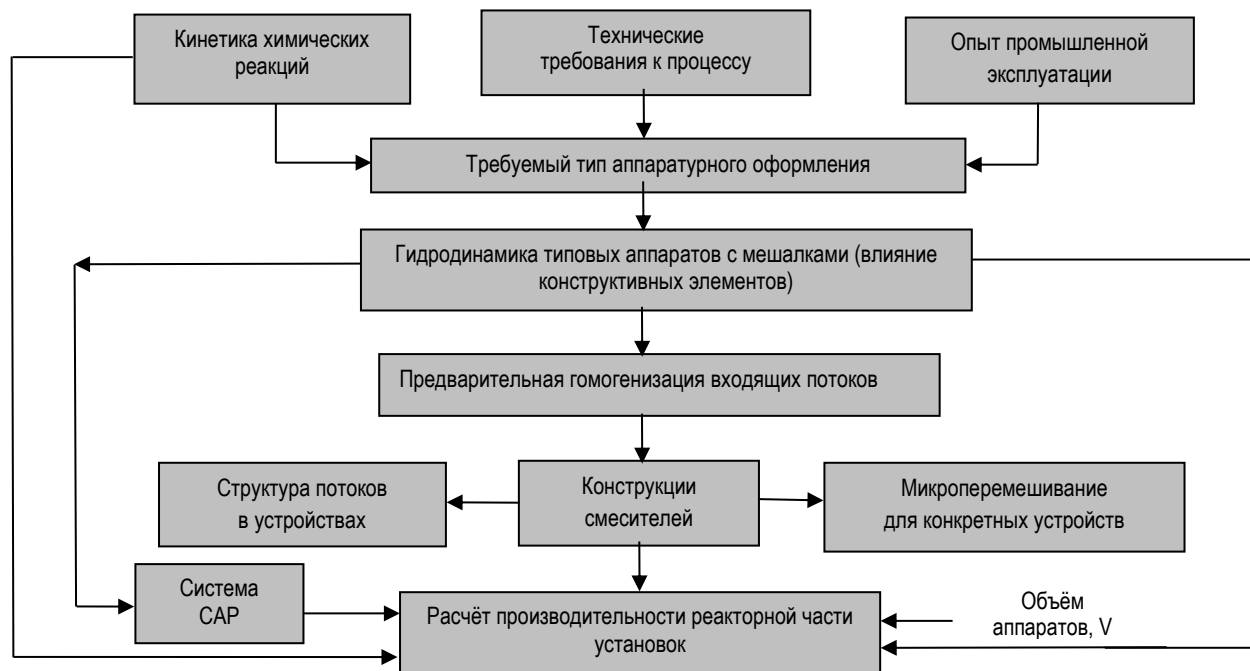


Рисунок 1 – Методология проектирования реакторной части установок очистки сточных вод

Игнорирование перечисленных выше факторов резко снижает эффективность использования стандартных аппаратов с мешалками для проведения химических реакций в промышленном производстве, что приводит к увеличению общего числа аппаратов или к необоснованному увеличению объемов аппаратов в технологической линии. Это, в свою очередь, является причиной высокой металло- и энергоёмкости промышленных технологических линий очистки сточных вод [5, 6].

Так как от времени пребывания перерабатываемой среды в аппаратах химической технологии зависят процессы массопереноса и химического превращения, то информация о функциях распределения времени пребывания (РВП) является одним из основных параметров изучаемого объекта [12, 14, 15, 16, 22]. Проведение подобных исследований необходимо для определения реальной гидродинамической обстановки внутри аппарата, выявления в нём застойных и байпасных зон, а значит исключения установки чувствительных элементов систем автоматического регулирования в точках, искажающих реальный ход химических процессов.

О структуре потока в реакторе судят по выходному сигналу или так называемому «отклику» на входное возмущение.

Предварительно, были проведены лабораторные исследования гидродинамических процессов, происходящих в реакторе в лабораторных условиях. Получены данные по структуре потоков. Исследование функции распределения времени пребывания (РВП) без искажений возможно только на реальных промышленных аппаратах [11, 12, 17]. Поэтому исследование этой функции производилось на промышленном аппарате $V = 3,2 \text{ м}^3$ с рамной мешалкой на реальных очистных сооружениях предприятия, в котором осуществлялся автоматизированный процесс обработки сточных вод, содержащих ЛКМ, совместно с содержащими хром сточными водами.

Функция РВП изучалась по реакции химического аппарата $V = 3,2 \text{ м}^3$ с рамной мешалкой на возмущение, подаваемое на вход в реактор. Так как аппарат «не прозрачен», и информация о движении частиц внутри него отсутствовала, был использован термин «чёрный ящик», применяемый в химической кибернетике [11].

О структуре потока в аппарате судили по выходному сигналу или так называемому «отклику» аппарата на входное возмущение [11].

Методики определения, построения кривых РВП, а также обработку результатов экспериментов выполняли согласно [17]. Частицы индикатора, попадая внутрь аппарата, начинают двигаться от входа к выходу в соответствии со структурой потока. Чем больше частиц индикатора одновременно появляется на выходе, тем выше их концентрация.

Эксперимент проводился следующим образом:

- объёмным способом устанавливался расход воды, подаваемой насосом в реактор;
- заполнялась половина объёма реактора водой;
- определялась концентрация трассера в исходной воде (фон);
- включалось перемешивающее устройство;
- вводилось предварительно рассчитанное количество трассера в реактор;
- доводился уровень воды в реакторе до перелива;
- перемешивание содержимого реактора осуществлялось до того момента, пока концентрация трассера не достигала расчётного значения;
- включался насос подачи воды в реактор;
- оттарированный ранее расход поддерживался постоянным в ходе эксперимента;
- через определённые промежутки по времени производился отбор проб на выходе из реактора.
- определялась концентрация трассера в пробах;
- эксперимент повторялся многократно при постоянном и различном расходе.

Картина движения потоков в большинстве непрерывно действующих стандартных химических аппаратов не отвечает ни идеальному вытеснению, ни идеальному смешению. По структуре потоков эти аппараты можно считать аппаратами промежуточного типа.

Проведённые исследования [18] и анализ экспериментов показали, что кривые откликов лабораторного аппарата, снятые при различных расходах жидкости и разных оборотах мешалки, идентичны, т. е. структура потока в аппарате в довольно широких пределах не зависит от скорости вращения мешалки и скорости подачи жидкости. Структура потоков близка к модели идеального перемешивания [12, 18, 19, 20].

Экспериментально определены гидродинамические процессы в химических аппаратах, что позволило правильно разместить измерительные приборы, оборудовать и разработать высокоэффективную технологию очистки сточных вод, содержащих ЛКМ, в рамках существующей схемы очистки сточных вод гальванического производства предприятия, и при этом многократно снизить объём и энергоёмкость химического оборудования [21, 22, 23, 25].

Исследования показали, что полное смешение участвующих в химическом процессе веществ достигается при подаче реагентов и сточных вод в зону интенсивного перемешивания (на края лопастей мешалки). Анализ экспериментов показал, что кривые откликов лабораторного аппарата, снятые при различных расходах жидкости в узком интервале (190÷300 об/мин.) мешалки, идентичны [24].

Аппараты с перемешивающими устройствами приближаются по структуре потока к модели идеального перемешивания, когда велика мощность мешалки, мала вязкость жидкой среды и мал расход по сравнению с циркуляцией жидкости внутри аппарата [11, 12, 22].

Все это в итоге позволило правильно произвести обвязку реакторов технологическими трубопроводами и определить места установки чувствительных элементов автоматики для объективного отражения хода технологических процессов.

В значительной мере избежать ошибки при определении объёма и времени пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах можно устранить правильной их обвязкой и использованием формулы, предложенной Е. А. Урецким [5]:

$$T_P = T_{C.P.} + T_{И.Д.} + T_{Х.А.} + T_{И.М.} + T_M + T_{K,C}, \quad (1)$$

где:

- T_P – время пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах;
- $T_{C.P.}$ – интервал времени, учитывающий задержки в формировании сигнала - рассогласования (определяется местом установки датчика);

- $T_{И.Д.}$ – интервал времени, учитывающий инерционность датчика (берётся по паспорту);

- $T_{Х.А.}$ – время перевода реагента в химически активную форму. Время, необходимое для максимального диспергирования реагента в реакционном объёме;

- $T_{И.М.}$ – интервал времени, учитывающий инерционность исполнительного механизма;

- T_M – время массообмена;

- T_K – кинетические постоянные реакции. Для реакторов обработки, содержащих хром сточных вод – 5–10 секунд, для реакторов – нейтрализации всех видов сточных вод – 300–400 секунд.

В случае строгого выполнения всех рекомендаций и пояснений, приведенных в [5], время пребывания сточных вод в реакторах, достаточное для завершения технологических процессов, составит:

- для реакторов, содержащих хром сточные воды – 3–5 минут;
- для реакторов-нейтрализаторов всех видов сточных вод – 6–9 минут.

При подборе реакторов необходимо:

- для непрерывно работающих реакторов (проточных) принимать аппараты с рамной или пропеллерной мешалкой;
- для реакторов периодического действия принимать аппараты с пропеллерной или турбинной мешалкой.

Для проточных реакторов сточных вод реагенты необходимо вводить в нижнюю зону реактора под мешалку, а отвод обработанных сточных вод осуществлять в верхнем уровне.

Устранение этих негативных факторов в достаточной мере возможно при использовании разработанного и апробированного на базовом предприятии реакторного узла, состоящего из двух химических аппаратов (аппарат приближающийся к идеальному смешению и аппарат приближающийся к идеальному вытеснению), показанного на рисунке 2 [5, 22, 25].

Работая с проектными реагентами – серной кислотой (H_2SO_4) и бисульфитом натрия – ($NaHSO_3$), САР, управляющая процессом восстановления хрома (VI) до хрома (III), работала на локальных очистных сооружениях базового предприятия относительно стабильно. Однако при переходе на более экономичный режим использования кислых ОТП производств защитных покрытий (гальваника и покраска), используемых в процессах травления и активации вместо или совместно с популярными реагентами, такая система оказалась неработоспособной.

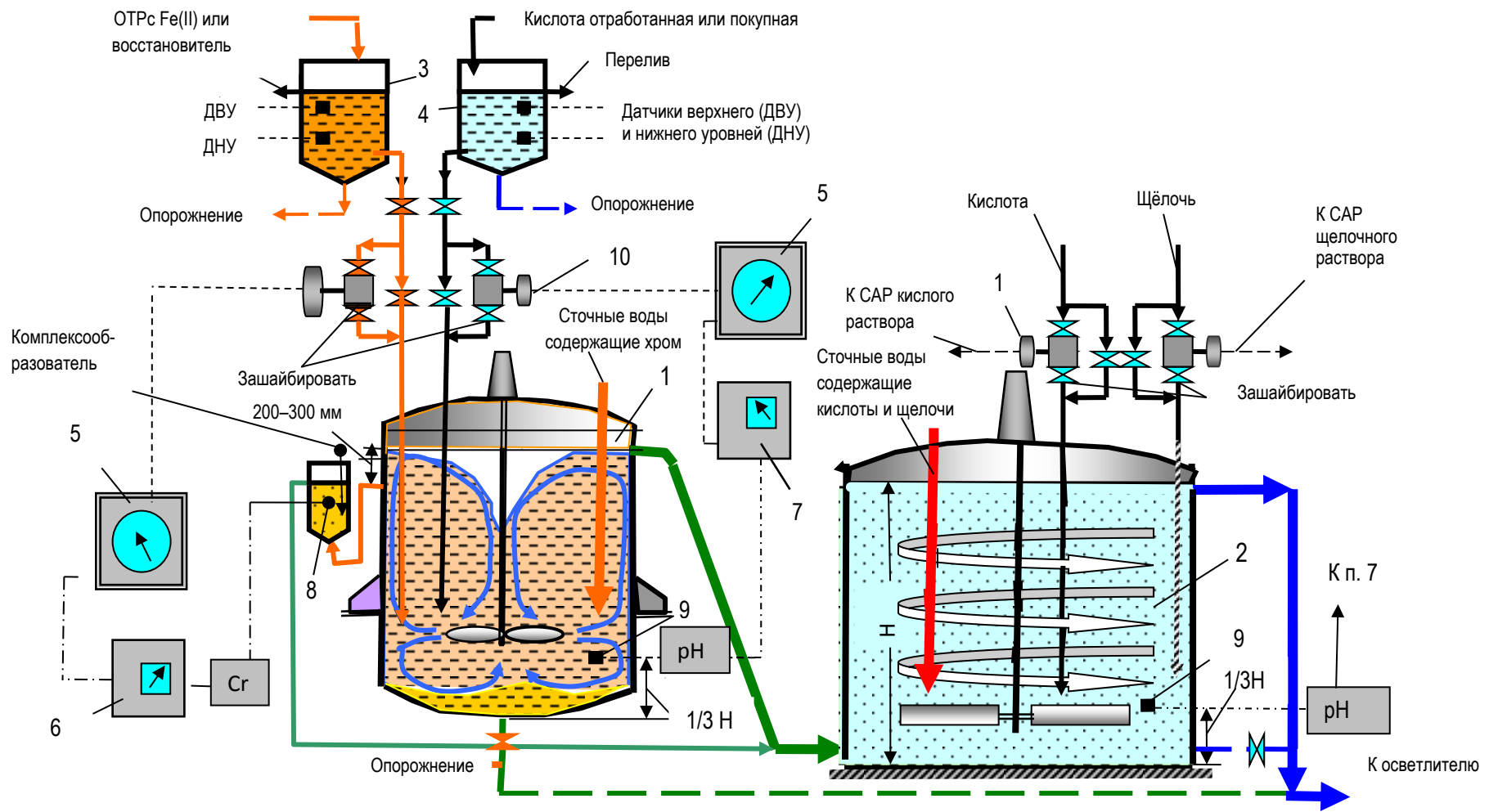
Это объясняется тем, что эти ОТП содержат высокие концентрации как ионов железа (II), так и ионов железа (III). Вследствие присутствия в реакционной системе ионов железа (III), САР, как и на наличие ионов хрома (VI), даёт сигнал на подачу в реактор восстановитель кислых ОТП. Несмотря на то, что процесс восстановления хрома (VI) в нём завершён, сигнал на закрытие задвижки от САР не поступает, и в результате этого весь раствор восстановителя $NaHSO_3$ из дозирующей ёмкости выливается в реактор.

Кроме того, проектным решением на базовом предприятии было предусмотрено управление только подщелачиванием общего потока усреднённых сточных вод. Такой подход не позволял ограничивать верхний предел величины рН, что периодически приводило к растворению оксигидратного коллектора и адсорбированных на нём ЛКМ. Вследствие этого имел место постоянный вынос взвеси из отстойника в канализацию.

Для использования в процессе очистки сточных вод с использованием ОТП, САР реакторного узла процесса нейтрализации и восстановления хрома необходимо усовершенствование по схеме (рисунк 2), гарантирующей не только работу схемы в целом, но и очистку сточных вод от ЛКМ в частности.

Объясняется это тем, что чувствительный элемент сигнализатора хрома при содержании железа (III) более 5 мг/дм³ становится неработоспособным.

Для практического использования результатов исследования найдено такое техническое решение, которое исключает воздействие ионов железа (III) образовывать устойчивые комплексные ионы с некоторыми соединениями, а именно, ортофосфорной кислотой (H_3PO_4) или щавелевой кислотой ($H_2C_2O_4$). Эти вещества в водных растворах легко реагируют с ионами трехвалентного железа [21, 22].



1 – реактор-смеситель сточных вод содержащих хром $V = 1 \text{ м}^3$; 2 – реактор-вытеснитель нейтрализации всех видов сточных вод – 2 м^3 ; 3 – дозатор отработанных технологических растворов (ОТР), содержащих железо (II) или резервный товарный восстановитель; 4 – дозатор кислых ОТР или резервный покупной; 5 – потенциометр КСП –Зп; 6 – вторичный прибор Сг –метра; 7 – вторичный прибор рН – метра П-205; 8 – первичный датчик хром-метра ЭЗ-01; 9 – первичный датчик рН-метра ДПГ-4м; 10 – мембранный исполнительный механизм с пневмоздвижкой

Рисунок 2 – Реакторный узел обработки сточных вод содержащих хром и сточных вод содержащие кислоты и щелочи с элементами САР

В результате производственных испытаний сигнализатор наличия шестивалентного хрома, а следовательно, и вся САР, становится работоспособной при введении в реакционную среду ортофосфорной кислоты. При добавлении в раствор восстановителя, необходимого для полного восстановления, происходит резкий скачок потенциала.

В случае применения в качестве комплексообразователя щавелевой кислоты избирательная чувствительность сигнализатора еще больше возрастает, так как величина потенциала в точке перехода становится еще больше.

Комплексообразование, вызывая изменение концентрации свободных ионов окисленной формы, обуславливает изменение редокс-потенциала системы и избирательно убирает влияние «мешающего» фона в работе хром-метра. Эта особенность устраняла возникшие затруднения, однако не решала вопрос о месте ввода в технологическую схему комплексообразующего агента. При введении маскирующего комплексообразующего агента непосредственно в обрабатываемую среду потребовалось бы большое количество ортофосфорной кислоты (15±20 т в год), а в случае же выбора щавелевой кислоты потребовалось бы еще и дополнительное оборудование по приготовлению рабочего раствора.

Для устранения возникших проблем разработано и использовано «Устройство для регулирования процесса обезвреживания промышленных сточных вод» [14, 22].

При использовании доработанных стандартных САР открылась возможность рационального использования создающих «мешающий фон» отработанных технологических растворов вместо покупных реагентов.

Это в полной мере проявилось в процессе эксплуатации реакгентной схемы локальных очистных сооружений на базовом предприятии. Реакторный узел, на котором реализована технология обработки содержащих хром сточных вод и сточных вод содержащих кислоты и щелочи с элементами САР, работает следующим образом: сточные воды во всех реакторах узла подаются в нижнюю зону под мешалку. Сюда же подаются и реагенты.

Чувствительный элемент ЭЗ-01 (поз. 8) сигнализатора наличия хрома (VI) устанавливается на глубине 200±300 мм от уровня переливного патрубка реактора-смесителя (поз. 1).

При появлении в реакционной системе шестивалентного хрома чувствительный элемент ЭЗ-01 (поз. 8) сигнализатора наличия хрома (VI) подаёт сигнал на вторичный прибор (поз. 6). Усиленный вторичным прибором электрический сигнал воздействует на потенциометр КСП-3п (поз. 5), оборудованный изодромным пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором.

В потенциометре КСП-3п (поз. 5) электрический сигнал преобразуется в пропорциональный пневматический и далее воздействует на мембранный исполнительный механизм (МИМ), раствор восстановителя начинает поступать в реактор. При исчезновении в системе хрома (VI) пневмоклапан (поз. 10) закрывается.

Для поддержания оптимальной величины pH = 2,5–3,0 в реакторе-восстановителе (поз. 1) на глубине 1/3H от дна размещается чувствительный элемент pH-метра марки ДПГ-4м (поз. 9).

При повышении pH среды более 3,0 датчик ДПГ-4м (поз. 9) подает сигнал на вторичный прибор pH-метра П-215 (поз. 7). Для его усиления воздействует на потенциометр КСП-3п (поз. 5), оборудованный изодромным пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором. В потенциометре КСП-3п (поз. 5) электрический сигнал преобразуется в пропорциональный пневматический и далее воздействует на мембранный исполнительный механизм (МИМ) пневмоклапана (поз.10). Клапан открывается, кислый раствор начинает поступать в реактор (поз. 1). По достижении величины pH = 2,5, установленной на датчике потенциометра КСП-3п, пневмоклапан закрывается. Принцип работы САР подачи щелочного и кислого реагента для поддержания pH = 8–8,5 в реакторе-нейтрализаторе (поз. 2) аналогичен САР поддержания оптимального pH в реакторе-восстановителе поз. 1.

Баки-дозаторы (поз. 3, 4) оборудуются датчиками уровня, которые управляют работой насосов подачи рабочих растворов в эти баки.

Описанные выше изменения САР включены в схемы базового объекта и в схемы предприятий, где производилось внедрение новой технологии.

В дальнейшем проведены исследования зонированных аппаратов, совмещающих в одном объёме процессы идеального смешения и идеального вытеснения на базе аппарата с турбинной мешалкой, секционированного диском [8].

Описание установки. Для проведения экспериментов была собрана конструкция по [8] и изготовлен аппарат на базе стандартного емкостного аппарата, показанного на рисунке 3.

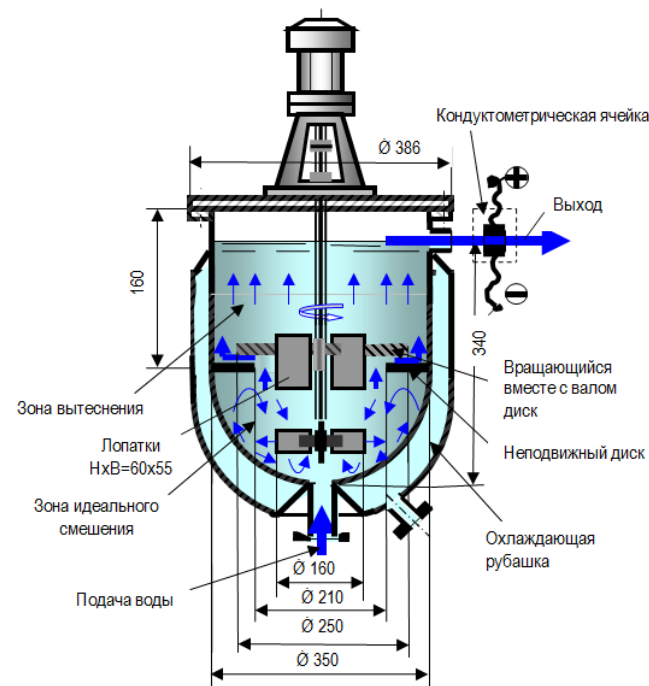


Рисунок 3 – Стандартный химический аппарат с турбинной мешалкой, дооборудованный устройствами согласно [8]

Данный аппарат снабжен четырёхлопастной мешалкой турбинного типа, делающей 48 об/мин, в который согласно [8] добавлены вращающийся вместе с валом диск, неподвижный диск, поднимающиеся верх-вниз относительно вращающегося диска, лопатки $H \times B = 60 \times 55$ мм, обеспечивающие различную степень перемешивания сточных вод в зоне вытеснения.

Методика проведения экспериментов и обработка данных. При изучении структуры потоков ввод жидкости осуществлялся через нижний штуцер аппарата, а кондуктометрическая ячейка для определения концентрации индикатора располагалась на уровне перелива, как показано на схеме лабораторной установки (рисунок 3). Кривые отклика снимались индикаторным методом.

Θ относительное время:

$$\Theta = \frac{t_i}{\tau}, \text{ мин.} \quad (2)$$

где t_i – текущее время пребывания жидкости в аппарате, мин.

τ – среднее значение времени пребывания, мин.

В качестве индикатора был выбран раствор соли KCl, который вводился импульсно перед нижним штуцером аппарата. Полученные кривые отклика показаны на рисунках 4, 5, 6.

$F(\Theta)$ – безразмерная величина.

Секционирование аппаратов кардинально улучшило структуру потоков. Так, с одной стороны улучшилось качество смешения входящего потока, что следует из высокого значения, с другой стороны произошло улучшение структуры потоков, с точки зрения приближения её к модели идеального вытеснения.

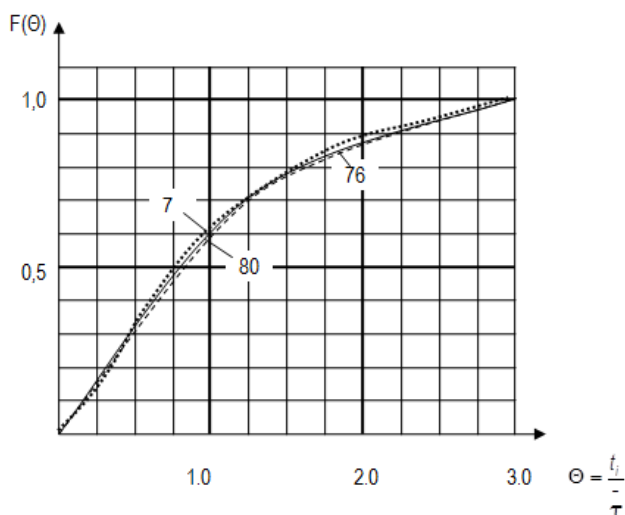


Рисунок 4 – Безразмерная кривая отклика аппарата $V = 25 \text{ дм}^3$ с турбинной мешалкой (48 об/мин) при подаче жидкости снизу, а выходе – на переливе, когда ввод индикатора осуществлялся через центробежный смеситель типа «улитки» (75, 76, 80 – номера опытов)

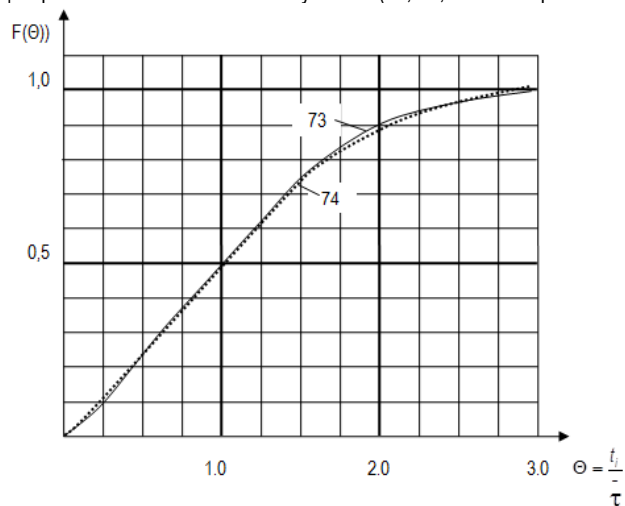


Рисунок 5 – Безразмерная кривая отклика ячеечной модели с неравными ячейками $m = \tau_1/\tau_2$ в секционированном аппарате, $V = 25 \text{ дм}^3$ с турбинной мешалкой (48 об/мин) при подаче жидкости снизу, а выходе – на переливе (73, 74 – номера опытов)

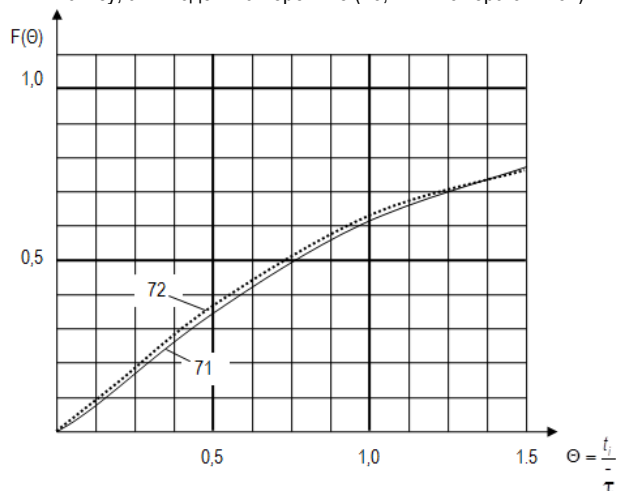
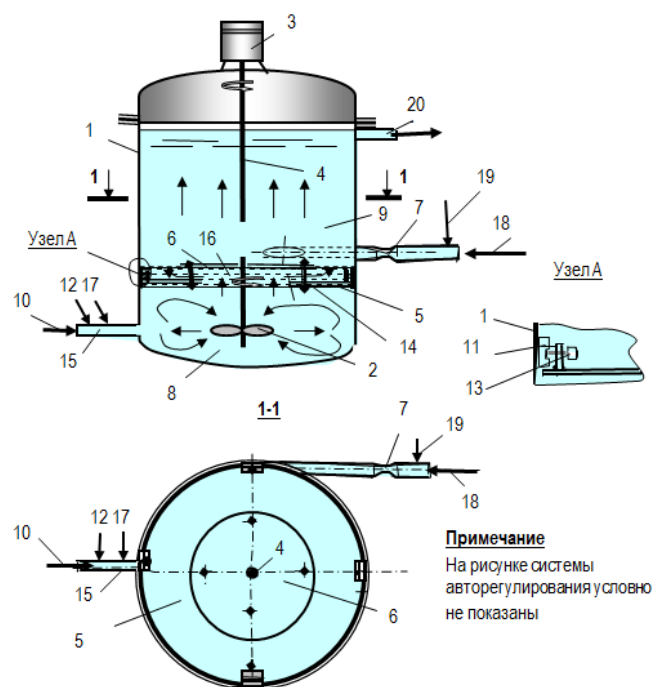


Рисунок 6 – Безразмерная кривая отклика аппарата $V = 25 \text{ дм}^3$ с турбинной мешалкой (48 об/мин) при подаче жидкости снизу, а выходе – на переливе (72, 71 – номера опытов)

На базовом предприятии было проведено дальнейшее усовершенствование ранее внедрённого по [8] стандартного химического аппарата ёмкостью 3,2 м3. Его целью по-прежнему являлось совмещение в одном объёме процессов смешения, реакции и хлопьеобразования (рисунок 7) [9, 10].



1 – корпус; 2 – пропеллерная мешалка; 3 – двигатель с редуктором; 4 – вал; 5 – нижняя кольцевая перегородка; 6 – верхняя кольцевая перегородка; 7 – вихревой смеситель; 8 – нижняя зона (реактор-смеситель); 9 – верхняя зона (реактор-вытеснитель + камера хлопьеобразования); 10 – смесь сточных вод содержащих хром и ЛКМ; 11 – подвижная пластина; 12 – р-р бисульфита натрия; 13 – распорный болт; 14 – крепёжные болты; 15 – подводящий патрубок; 16 – промежуточная зона; 17 – р-р серной кислоты; 18 – подача сточных вод на нейтрализацию; 19 – нейтрализующий реагент; 20 – отводящий патрубок

Рисунок 7 – Аппарат для проведения стадий перемешивания, реакции и хлопьеобразования [10]

Исходя из этого было сконструировано техническое устройство [10] которое, содержит корпус 1, оборудованный пропеллерной мешалкой 2, приводимой во вращение электродвигателем 3 через вал 4 и редуктор. В корпусе аппарата находятся подвижные по высоте нижняя 5 и верхняя 6 горизонтальные кольцевые перегородки. При этом горизонтальные перегородки 5, 6 могут перемещаться по вертикали вверх и вниз и фиксироваться на определённом уровне крепёжным узлом А «в распор». Кольцевые перегородки 5 и 6 разделяют устройство на три зоны.

Нижняя зона 8 представляет собой реактор-смеситель, в который через входной патрубок 15 подается смесь обрабатываемой жидкости 10. В эту зону направляются необходимые для проведения химических реакций реагенты 12, 17. Перемешивание обрабатываемой смеси в этой зоне осуществляется быстроходной пропеллерной мешалкой 2.

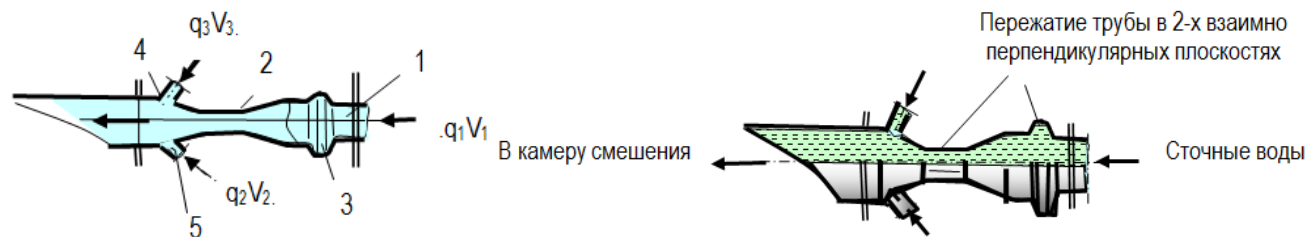
Промежуточная плоскопараллельная зона 16 находится между верхней 6 и нижней 5 горизонтальными кольцевыми перегородками. Здесь же в кислой среде осуществляется восстановление шестивалентного хрома до трёхвалентного и деструкция части органических загрязнений сточных вод 10.

Из нижней части по мере поступления в неё сточной жидкости обработанная смесь передавливается в промежуточную плоскопараллельную зону 16, которая находится между верхней 6 и нижней 5 горизонтальными кольцевыми перегородками. Вращение жидкости

в этой зоне 16 осуществляется жидкостью зоны 8. Далее из зоны 8 кислая смесь жидкости направляется в зону 9 на нейтрализацию и хлопьеобразование.

В верхнюю зону аппарата 9 остальной поток сточных вод подается через вихревой смеситель 7 (рисунок 8, 9). Оно представляет собой сплюснутый в двух взаимно перпендикулярных

направлениях патрубков. Поток воды, проходя в нём через сжатые овальные сечения 6 и 7, ускоряется и приобретает винтовой характер, чем достигается интенсивное смешение в полном объёме жидкости на выходе. Непосредственно перед входом в зону 9 через насадки 4, 5, расположенным под углом к боковым сжатым сечениям, вводятся реагенты.



1 – входной тангенциальный патрубок; 2 и 3 – развёрнутые под углом 90° сжатые овальные сечения; 4, 5 – насадки для ввода реагентов
Рисунок 8 – Вихревой смеситель (фрагмент вихревого аппарата, пат. ВУ 4810) [9]

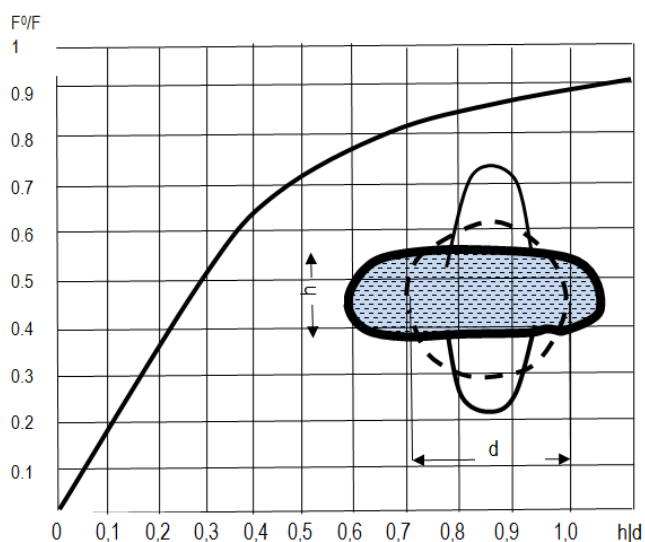


Рисунок 9 – Отношение площадей F_0/F овального сечения к круглому сечению в зависимости от степени пережатия цилиндрического насадка. Геометрические характеристики насадка

Проведенные исследования, показали, что степень сегрегации реагентов и обрабатываемых сточных вод при последовательном прохождении их через входной тангенциальный патрубок 3 и камеру смешения 2 составляет не менее 95 %.

Далее, смесь различных сточных вод и нейтрализующих кислых или щелочных растворов подается в зону 9. Эта зона совмещает в себе реактор-вытеснитель и хлопьеобразователь. Смешивание в ней осуществляется за счёт тангенциального ввода обрабатываемой смеси 11 из вихревого смесителя 7 и вращающегося верхнего слоя жидкости зоны 16. Обработанная в зоне 9 сточная вода сформированными хлопьями через отводящий патрубок 20 направляется в осветлитель.

Использование предлагаемой конструкции позволяет сократить до минимума количество технологического оборудования (смесители, реакторы, камеры хлопьеобразования) за счёт объединения их функций в одном объёме без уменьшения эффективности и производительности и не менее чем вдвое снизить металло- и энергоёмкость, а также уменьшить потребность в производственных площадях для его размещения.

В таблице 1 приведены результаты эксплуатации линии доочистки в сопоставлении с качеством технической и водопроводной воды, используемой на этом предприятии. Из полученных данных следует, что по основным показателям фильтрат по качеству соответствует технической воде.

Таблица 1 – Состав общего потока сточных вод на линии доочистки

№ п/п	Наименование ингредиента	Единица измерения	Средний, доверительный интервал концентраций		Наблюдаемый максимум после отстойника	
			До	После	До	После
1	Хром (VI)	мг/дм ³	90–110	Отсутствует	120	Отсутствует
2	Хром общ.	мг/дм ³	Не определялся	0,8–1,6	Не определялся	1,7
3	Цинк	мг/дм ³	21–28	Следы	32,1	0,2
4	Никель	мг/дм ³	2,2–4,9	Отсутствует	5,20	0,1
5	Железо	мг/дм ³	41–58	0,2–1,0	63,0	1,5
6	Медь	мг/дм ³	12–45	0,1–0,4	64,0	0,5
7	Кислота	мг-экв/дм ³	7,9–9,1	Отсутствует	10,8	Отсутствует
8	Щелочь	мг-экв/дм ³	3–4,2	Отсутствует	5,25	Отсутствует
9	pH		Не определялся	8,1–8,4	Не определялся	8,6
10	ХПК	мг/дм ³	1500–2000	12–18	2500	21,6

В случае необходимости в еще более высокой степени очистки воды вода потока доочищалась на локальных установках в основном производстве в соответствии с требованиями ОСТов. При этом степень возврата воды в производство должна составлять 85–90 %.

Заключение

В результате исследований:

1) разработана методология проектирования реакторной части установок очистки сточных вод, которая позволяет рассчитывать

аппаратурное оформление процесса на основе типовых аппаратов с механической мешалкой, обеспечивающих интенсивное перемешивание сточных вод с реагентами;

2) получена формула, которая в значительной мере позволяет избежать ошибок при определении объема и времени пребывания сточных вод в автоматизированных реакторах;

3) предложена конструкция реакторного узла обработки сточных вод содержащих хром и сточных вод содержащих кислоты и щелочи с элементами САР, позволяющая эффективно использовать

стандартное оборудование и отработанные технологические растворы уменьшая экологическое воздействие на окружающую среду;

4) выполнены исследования, которые позволили разработать и внедрить зонированные химические аппараты, совмещающие в одном объеме зоны идеального смешения и идеального вытеснения. Такие аппараты, по сравнению со стандартными, обладают многократно сниженными металлоемкостью и энергопотреблением.

Список цитированных источников

1. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. / Л. Андриамирадо [и др.] ; науч. ред.: М. И. Алексеев [и др.] . – СПб. : Водоканал Санкт-Петербурга : Новый журн., 2007. – Т. 2. – С. 777–1696.
2. Хенце, М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
3. Справочник по современным методам и технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию / ДАНСЭЕ, отдел по Восточной Европе. – Копенгаген, 2001. – 253 с.
4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. – СПб. : Профессионал, 2006. – Ч. 2. – 916 с.
5. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : Изд-во АСВ, 2022. – 624 с.
6. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения : справочное пособие / Е. С. Гогина, А. Д. Гуринович, Е. А. Урецкий. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2012. – 312 с.
7. Урецкий, Е. А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : монография / Е. А. Урецкий, Е. С. Гогина, В. В. Мороз. – М. : АСВ, 2023. – 618 с.
8. Авторское свидетельство SU998365A1, МПК С 02F 1/00. Устройство для очистки промышленных сточных вод : заявлено 03.08.1981 / Беличенко Ю. П., Колмаровский М. П., Митин Б. А., Урецкий Е. А., Савченко В. А. – 2 с.
9. Патент BY4810U, МПК B01F5/00(2006). Вихревой аппарат : № u 20080317 : заявлено 16.04.2008 : опубл. 04.08.2008 / Урецкий Е. А., Мороз В. В., Дмухайло Е. И. ; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. – Гос. реестр полезн. моделей.
10. Патент BY10812U, МПК C02F1/00(2006.01). Устройство для проведения физико-химических процессов : № u 20150099 : заявлено 26.01.2015 : опубл. 19.03.2015 / Урецкий Е. А., Мороз В. В. ; заявитель Брестский гос. техн. ун-т. – Гос. реестр полезн. моделей.
11. Тябин, Н. В. Методы химической кибернетики в реологии и химической технологии : учебное пособие / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград : Волгоградский политехнический институт, 1983. – 104 с.
12. Мороз, В. В. Изучение реальной гидродинамической обстановки в промышленном аппарате $V=3,2\text{м}^3$ с механической мешалкой, используемой для обработки смеси стоков гальванического и окрасочного производства / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2013. – № 2 (80). – С. 60–62.
13. Урецкий, Е. А. Ресурсосберегающие технологии в водном хозяйстве промышленных предприятий : монография / Е. А. Урецкий ; под ред. С. Е. Березина. – Брест : БрГТУ, 2008. – 320 с.
14. Мороз, В. В. Ресурсосберегающая реагентная технология совместной очистки сточных вод лакокрасочных и гальванических производств приборо- и машиностроения / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий, А. П. Дарманян // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика и геоэкология. – 2018. – № 2 (110). – С. 134–138.
15. Мороз, В. В. Оптимизация работы вертикальных отстойников путем добавления в них зернистых хлопьеобразователей и полочных модулей / В. В. Мороз, А. Д. Гуринович, Е. А. Урецкий // Проблемы энергетической эффективности в различных отраслях : сб. ст. науч. семинара, Брест, 21 марта 2015 г. / Брестский гос. техн. ун-т ; под ред. М. В. Стрельца [и др.]. – Брест, 2015. – С. 105–111.
16. Опыт повторного использования сточных вод на предприятии приборо- и машиностроения / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий, Л. Д. Субботкин, А. П. Дарманян // Строительство и техногенная безопасность : сб. науч. трудов. – Симферополь : НАПКС, 2018. – № 11 (63). – С. 97–103.
17. Технологическая линия по очистке производственных сточных вод гальванического участка дорожно-ремонтного предприятия Белорусской железной дороги, г. Лида, для проекта ИП АЕТЕ (Американские экологические технологии и оборудование) : НИР / рук. Е. А. Урецкий. – ИП АЕТЕ. ОДО «САФАРИ», 1997.
18. Лабораторный практикум по водоотведению и очистке сточных вод : учеб. пособие для вузов / В. И. Калицун, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, Е. В. Алексеев ; под общ. ред. В. И. Калицуна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 2000. – 272 с.
19. Гордеев, Л. С. Жидкофазные химические реакторы. Процессы и аппараты химической технологии / Л. С. Гордеев // Итоги науки и техники. Сер. ВИНТИ. – 1976. – Т. 4. – С. 82–164.
20. Дарманян, А. П. Применение статических смесителей для интенсификации процесса перемешивания жидких сред / А. П. Дарманян // Повышение эффективности и надежности машин и аппаратов в основной химии : тезисы докладов Всес. совещания. – Сумы : Химтехника, 1986. – С. 185–186.
21. Мороз, В. В. Исследование возможности создания «попутной» технологии обработки сточных вод, загрязнённых лакокрасочными ингредиентами / Е. А. Урецкий, В. В. Мороз // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2007. – № 2 (44). – С. 71–74.
22. Мороз, В. В. Совершенствование системы автоматического регулирования (САР) процесса восстановления хрома (VI) в условиях «мешающего» фона / В. В. Мороз, Е. А. Урецкий // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2007. – № 2 (44). – С. 75–80.
23. Мороз, В. В. Расчет экономической эффективности внедрения ресурсосберегающей реагентной технологии совместной очистки сточных вод лакокрасочных и гальванических производств приборо- и машиностроения / Е. А. Урецкий, О. П. Белоглазова, В. В. Мороз // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика и геоэкология. – 2018. – № 2 (110). – С. 122–126.
24. Мороз, В. В. Ресурсосберегающая технология очистки сточных вод лакокрасочного производства в приборо- и машиностроении / В. В. Мороз // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2014. – № 2 (86). – С. 78–81.
25. Choosing Rational Technologies for the Final Purification of Wastewater from the Production of Protective Coatings and Printed-Circuit Boards / E. A. Uretskii, I. V. Nikolenko, V. V. Moroz [et al.] // Theor Found Chem Eng. – 2024. – Vol. 58. – P. 1327–1333. – DOI: 10.1134/S0040579524601973.

References

1. Tekhnicheskij spravochnik po obrabotke vody : v 2 t. / L. Andriamirado [i dr.] ; nauch. red.: M. I. Alekseev [i dr.]. – SPb. : Vodokanal Sankt-Peterburga : Novyj zhurn., 2007. – T. 2. – S. 777–1696.
2. Hence, M. Ochistka stochnyh vod. Biologicheskie i himicheskie processy / M. Hence, P. Armoes, J. Lya-Kur-Yansen [i dr.]. – M. : Mir, 2004. – 480 s.
3. Spravochnik po sovremennym metodam i tekhnologiyam ochildki prirodnyh i stochnyh vod i oborudovaniyu / DANSEE, otdel po Vostochnoj Evrope. – Kopenhagen, 2001. – 253 s.
4. Novyj spravochnik himika i tehnologa. Processy i apparaty himicheskikh tekhnologij. – SPb. : Professional, 2006. – CH. 2. – 916 s.
5. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : Izd-vo ASV, 2022. – 624 s.
6. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii promyshlennogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya : spravochnoe posobie / E. S. Gogina, A. D. Gurinovich, E. A. Ureckij. – M. : Associaciya stroitel'nyh vuzov, 2012. – 312 s.

7. Ureckij, E. A. Optimizaciya sushchestvuyushchih i razrabotka novyh resursosberegayushchih tekhnologij v vodnom hozyajstve predpriyatij priboro- i mashinostroeniya : monografiya / E. A. Ureckij, E. S. Gogina, V. V. Moroz. – M. : ASV, 2023. – 618 s.
8. Avtorskoe svidetel'stvo SU998365A1, MPK C 02F 1/00. Ustrojstvo dlya ochistki promyshlennyh stochnyh vod : zayavleno 03.08.1981 / Belichenko YU. P., Komarovskij M. P., Mitin B. A., Ureckij E. A., Savchenko V. A. – 2 s.
9. Patent BY4810U, MPK B01F5/00(2006). Vihrevoj apparat : № u 20080317 : zayavleno 16.04.2008 : opubl. 04.08.2008 / Ureckij E. A., Moroz V. V., Dmuhajlo E. I. ; zayavitel' Brestskij gos. tekhn. un-t. – Gos. reestr polezn. modelej.
10. Patent BY10812U, MPK C02F1/00(2006.01). Ustrojstvo dlya provedeniya fiziko-himicheskikh processov : № u 20150099 : zayavleno 26.01.2015 : opubl. 19.03.2015 / Ureckij E. A., Moroz V. V. ; zayavitel' Brestskij gos. tekhn. un-t. – Gos. reestr polezn. modelej.
11. Tyabin, N. V. Metody himicheskoy kibernetiki v reologii i himicheskoy tekhnologii : uchebnoe posobie / N. V. Tyabin, A. B. Golovanchikov. – Volgograd : Volgogradskij politekhnicheskij institut, 1983. – 104 s.
12. Moroz, V. V. Izuchenie real'noj gidrodinamicheskoy obstanovki v promyshlennom apparate $V=3,2m^3$ s mekhanicheskoy meshalkoj, ispol'zuej dlya obrabotki smesi stokov gal'vanicheskogo i okrasochnogo proizvodstva / V. V. Moroz, E. A. Ureckij // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2013. – № 2 (80). – S. 60–62.
13. Ureckij, E. A. Resursosberegayushchie tekhnologii v vodnom hozyajstve promyshlennyh predpriyatij : monografiya / E. A. Ureckij ; pod red. S. E. Berezina. – Brest : BrGTU, 2008. – 320 s.
14. Moroz, V. V. Resursosberegayushchaya reagentnaya tekhnologiya sovmestnoj ochistki stochnyh vod lakokrasochnyh i gal'vanicheskikh proizvodstv priboro- i mashinostroeniya / V. V. Moroz, E. A. Ureckij, A. P. Darmanyan // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika i geoekologiya. – 2018. – № 2 (110). – S. 134–138.
15. Moroz, V. V. Optimizaciya raboty vertikal'nyh otstojnikov putem dobavleniya v nih zernistyh hlop'eobrazovatelej i polochnyh modulej / V. V. Moroz, A. D. Gurinovich, E. A. Ureckij // Problemy energeticheskoy effektivnosti v razlichnyh otraslyah : sb. st. nauch. seminarov, Brest, 21 marta 2015 g. / Brestskij gos. tekhn. un-t ; pod red. M. V. Strel'ca [i dr.]. – Brest, 2015. – S. 105–111.
16. Opyt povtornogo ispol'zovaniya stochnyh vod na predpriyatii priboro- i mashinostroeniya / V. V. Moroz, E. A. Ureckij, L. D. Subbotkin, A. P. Darmanyan // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' : sb. nauch. trudov. – Simferopol' : NAPKS, 2018. – № 11 (63). – S. 97–103.
17. Tekhnologicheskaya liniya po ochistke proizvodstvennyh stochnyh vod gal'vanicheskogo uchastka dorozhno-remontnogo predpriyatiya Belorusskoj zheleznoj dorogi, g. Lida, dlya proekta IP AETE (Amerikanskie ekologicheskie tekhnologii i oborudovanie) : NIR / ruk. E. A. Ureckij. – IP AETE. ODO «SAFARI», 1997.
18. Laboratornyj praktikum po vodootvedeniyu i ochistke stochnyh vod : ucheb. posobie dlya vuzov / V. I. Kalicun, YU. M. Laskov, YU. V. Voronov, E. V. Alekseev ; pod obshch. red. V. I. Kalicuna. – 3-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 2000. – 272 s.
19. Gordeev, L. S. ZHidkofaznye himicheskie reaktory. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii / L. S. Gordeev // Itogi nauki i tekhniki. Ser. VINITI. – 1976. – T. 4. – S. 82–164.
20. Darmanyan, A. P. Primenenie staticheskikh smesitelej dlya intensifikacii processa peremeshivaniya zhidkikh sred / A. P. Darmanyan // Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti mashin i apparatov v osnovnoj himii : tezisy dokladov Vses. soveshchaniya. – Sumy : Himtekhnik, 1986. – S. 185–186.
21. Moroz, V. V. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya «poputnoj» tekhnologii obrabotki stochnyh vod, zagryaznyonnyh lakokrasochnymi ingredientami / E. A. Ureckij, V. V. Moroz // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2007. – № 2 (44). – S. 71–74.
22. Moroz, V. V. Sovershenstvovanie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya (SAR) processa vosstanovleniya hroma (VI) v usloviyah «meshayushchego» fona / V. V. Moroz, E. A. Ureckij // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2007. – № 2 (44). – S. 75–80.
23. Moroz, V. V. Raschet ekonomicheskoy effektivnosti vnedreniya resursosberegayushchej reagentnoj tekhnologii sovmestnoj ochistki stochnyh vod lakokrasochnyh i gal'vanicheskikh proizvodstv priboro- i mashinostroeniya / E. A. Ureckij, O. P. Beloglazova, V. V. Moroz // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika i geoekologiya. – 2018. – № 2 (110). – S. 122–126.
24. Moroz, V. V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya ochistki stochnyh vod lakokrasochnogo proizvodstva v priboro- i mashinostroenii / V. V. Moroz // Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Vodohozyajstvennoe stroitel'stvo i teploenergetika. – 2014. – № 2 (86). – S. 78–81.
25. Choosing Rational Technologies for the Final Purification of Wastewater from the Production of Protective Coatings and Printed-Circuit Boards / E. A. Ureckij, I. V. Nikolenko, V. V. Moroz [et al.] // Theor Found Chem Eng. – 2024. – Vol. 58. – P. 1327–1333. – DOI: 10.1134/S0040579524601973.

Материал поступил 16.01.2026, одобрен 16.02.2026, принят к публикации 16.02.2026