

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТРУКТУРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД И ВЫДЕЛЕНИЯ ОСАДКОВ**

**Н.С. Попов, А.В. Козачек,
А.В. Святенко, Чан Минь Тьинь**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор М.А. Промтов

Ключевые слова и фразы: водоочистка; принципы проектирования; структурное моделирование; технология очистки.

Аннотация: Разработан алгоритм структурного моделирования процессов водоочистки, необходимый при формировании облика технологической схемы. В основу алгоритма положены следующие принципы: композиционные, общесистемные, технологические, структурного моделирования и оптимального выбора.

Переработку твердых отходов в виде осадков и шламов невозможно осуществить без их выделения из загрязненных жидкостей. Между тем технологий выделения настолько много, что возникает задача выбора наилучших из числа возможных. В данной статье предложена методика проектирования технологий очистки загрязненных вод с одновременным выделением осадков как основы для переработки в утилизирующем комплексе Тамбовской области.

Проблему очистки природных и сточных вод от загрязняющих веществ по праву относят к «вечным» экологическим проблемам. И в эти дни так же, как и много лет назад, над ее решением трудятся ученые разных стран мира. Особую значимость эта проблема приобретает:

– в условиях дефицита питьевой и технологической воды требуемого качества;

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: isil.gross@gmail.com; Козачек Артемий Владимирович – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Святенко Андрей Викторович – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Чан Минь Тьинь – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов.

- при создании на предприятиях замкнутых систем водопользования;
- при уносе с жидкими отходами ценных веществ;
- при проектировании комплексных систем защиты природы от негативного воздействия загрязненных вод.

За всю историю решения практических задач накоплен большой опыт в создании теоретических основ водоочистки и водоподготовки [1–4], разработки уникального высокотехнологичного оборудования, позволяющего разделять многокомпонентные системы известного состава [2]. Однако, несмотря на очевидный прогресс, достигнутый в данной сфере деятельности, решение постоянно возникающих в промышленности и коммунальном хозяйстве новых задач по-прежнему остается весьма сложным делом.

Причин для такого утверждения несколько. Во-первых, количество новых видов синтетических загрязняющих веществ все время растет. К ранее известным добавляются новые вещества, свойства, и поведение которых в жидких средах изучено недостаточно. Во-вторых, меняются композиции загрязняющих веществ в сточных водах, что делает типовые технологии водоочистки малоэффективными. В-третьих, требования к качеству очистки раз от разу ужесточаются, а это ведет к модернизации действующих водоочистных систем. В каждом из названных вариантов возникает задача пересмотра старых и создания новых технологий очистки. Сложность ее решения связывают, прежде всего, с отсутствием какого-то одного способа разделения смеси веществ и отсутствием практичной общей методики обоснования аппаратного оформления технологического процесса водоочистки.

Разделение веществ базируется на различии их физико-химических свойств: чем существеннее это различие, тем вероятнее разработка способа их разделения, с последующим извлечением веществ из смеси. Разнообразием свойств и объясняется появление множества способов очистки, используемых на практике. При этом усложняется и поиск оптимальных решений по выбору технологических схем и аппаратов в том или ином конкретном случае.

Что же касается методики проектирования, то в настоящее время она напоминает «набор рецептов, используемых по случаю», иногда дополняемых необходимыми расчетами. Назрела потребность в сквозной систематизации известных подходов к проектированию водоочистных систем и разработке человеко-машинного алгоритма генерации проектных решений на всех этапах этого сложного и неоднозначного творческого процесса. При этом первоочередной задачей является выбор процессно-аппаратурного оформления технологической цепочки на основе использования идей структурного моделирования. В этой связи целью настоящей работы является использование метода структурного моделирования как основы для выбора и технико-экономического обоснования технологии очистки загрязненных вод.

Пусть исходный состав стоков, подлежащих очистке, представляет собой жидкофазную гетерогенную систему S_0 , содержащую основной компонент (растворитель) – воду и множество попавших в нее органиче-

ских и неорганических веществ (примесей). Классифицируя эти вещества по группам родственных признаков, представим S_0 в следующей форме записи:

$$S_0 = S_0(W, A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, F_0, G_0, H_0, t_0, \text{pH}_0), \quad (1)$$

где W – вода без примесей; A_0 – группа из крупнодисперсных нерастворимых веществ; B_0 – группа из мелкодисперсных нерастворимых веществ; C_0 – группа из растворимых в воде органических веществ; D_0 – группа из растворенных неорганических веществ; E_0 – группа из коллоидных частиц; F_0 – группа из растворенных в воде газов; G_0 – группа поверхностно-активных веществ; H_0 – группа из микробиологических примесей (вирусов, бактерий, грибов); t_0 – температура исходной воды; pH_0 – показатель кислотности (щелочности) водного раствора. Каждое вещество в группах W, A_0, B_0 характеризуется своей массовой долей, а в группах C_0, \dots, H_0 – концентрацией.

Задача проектирования водоочистки заключается в выборе технологии обработки загрязненной воды (схемы, аппаратного оформления и режимов работы), позволяющей получать на выходе воду требуемого качества по веществам в группах $A-C$, с допустимой температурой t_k и pH_k среды, и отсутствием примесей в группах A, B, E и H . При этом водный раствор на выходе представляет собой гомогенную жидкофазную систему S_k вида:

$$S_k = S_k(W, \emptyset, \emptyset, C_k, D_k, \emptyset, \emptyset, t_k, \text{pH}_k), \quad (2)$$

где \emptyset – знак пустого множества, свидетельствующий об отсутствии примеси в группах A, B, E, H ; C_k, D_k – группы с допустимым содержанием веществ; t_k, pH_k – температура и pH среды в выходном потоке воды.

На рисунке 1 показаны формальные «образцы» воды на входе и выходе водоочистной системы, из которых следует, что в S_k содержание групп примесей меньше, а значит качество воды на выходе выше, чем на входе в S_0 . Заложенная в технологию совокупность операций (стадий) по очистке воды в целом представляет собой сложную химико-технологическую систему (ХТС), в которой отдельную операцию по очистке или обезвреживанию воды в зависимости от способа ее обработки (химического или биохимического) будем рассматривать как физико-химическую систему (ФХС), или как биохимическую систему (БС) [5, 6].

С учетом этого задачу проектирования водоочистной технологии сформулируем следующим образом: для известного входного состава загрязняющих веществ необходимо найти такую последовательность технологических T_i и биохимических B_i операторов, либо их возможных сочетаний $[ТБ]_i$, которые в пределах ФХС и БС i -й стадии преобразуют систему S_0 в S_k

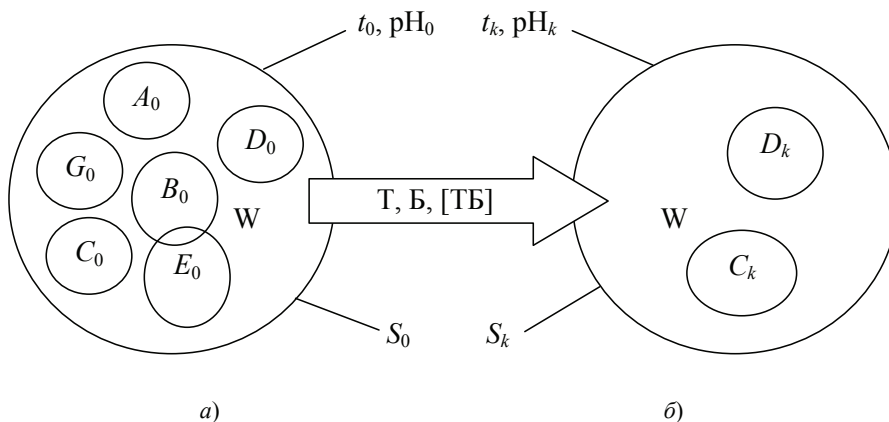


Рис. 1. Композиционные структуры воды:
a – очищаемой; *б* – очищенной

$$T_i, B_i, [TB]_i : S_0 \rightarrow S_i \rightarrow, \dots, \rightarrow S_{k-l} \rightarrow S_k, \quad (3)$$

где S_i – состояние водного потока на выходе i -й стадии, $i = \overline{1, k}$; S_0, S_i, \dots, S_k – улучшающая последовательность стадий по формированию заданного качества воды.

Операторы T , B и $[TB]$ обладают исключительной значимостью, поскольку могли бы дать исчерпывающее представление о ФХС и БС в силу своей физической реальности. Однако полное представление о них у проектантов отсутствует. Можно предположить, что они имеют сложную структуру, образованную в результате наложения «элементарных» технологических операторов: химических и фазового превращения; диффузионного, конвективного и турбулентного переносов вещества и тепла; смешения; осаждения т.д. В общем случае эти операторы отражают совокупность линейных, нелинейных, распределенных в пространстве и переменных во времени процессов и имеют смешанную детерминировано-стохастическую природу.

Аппроксимацией операторов T , B , $[TB]$ оказываются соответствующие им математические модели M_T , M_B , M_{TB} . Только с их помощью возможен расчет технологической схемы. А поскольку модель является лишь отображением реального оператора, вместо S_k фактически получаем \hat{S}_k , переменные состояния которой оказываются отличными от действительных на величину погрешности модели. Отсюда повышение точности модели признается важнейшим этапом ее разработки.

Исходя из бинарности любого процесса классификация веществ по свойствам, процесс водоочистки можно интерпретировать как многостадийный, с разделением потока загрязняющих веществ на каждой стадии как минимум в два направления: отводимого «целевого» компонента i -й стадии (ЦКС_i) и всех остальных веществ, оставшихся в растворе. Две принципиально важных схемы водоочистки приведены на рис. 2.

Поскольку на каждой стадии удаляется определенная масса загрязняющих веществ, то с ростом числа стадий эта масса будет постоянно

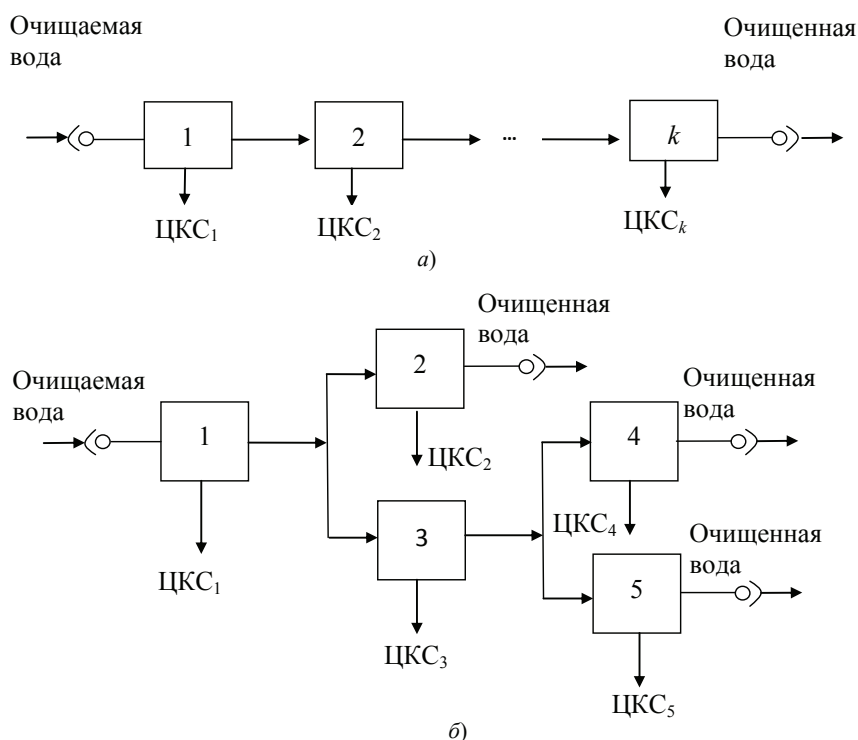


Рис. 2. Варианты схем водоочистки:

a – последовательная обработка; *б* – каскадная обработка

уменьшаться, ибо на выходе из системы очищенная вода должна содержать примеси в минимально допустимом количестве. При этом затраты на очистку с каждой новой стадией должны прогрессивно возрастать, поскольку достичь высоких стандартов качества очистки можно лишь с использованием дорогостоящего оборудования и значительных эксплуатационных расходов (рис. 3).

Присутствие в очищаемой воде опасных, для каких-либо стадий очистки, примесей крайне нежелательно (например, масел, солей тяжелых металлов, песка и т.д.). Их следует удалять раньше той стадии, на которой они могут привести к срыву процесса очистки. Аналогичным образом следует поступать с токсичными или заразными веществами, случайно оказавшимися во входном потоке воды (вирусами, канцерогенами, возбудителями болезней), поскольку они могут быть опасны для здоровья персонала.

Высказанные соображения универсальны, в то время как решение конкретных практических задач нуждается в значительно большем объеме информации о качестве очищаемой воды, предъявляемых требованиях к очищенной воде и в специальном алгоритме человеко-машинного проектирования, на каждом этапе реализации которого существует возможность выбора важнейших характеристик, определяющих и формирующих облик водоочистной технологии. Последовательность работы алгоритма становится очевидной из рассмотрения рис. 4.

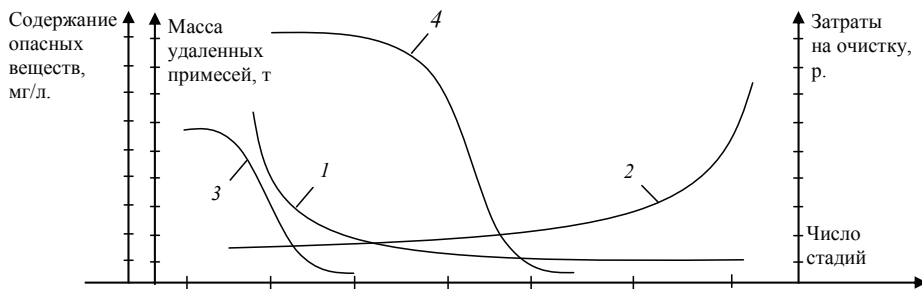


Рис. 3. Качественное изменение основных характеристик процесса очистки

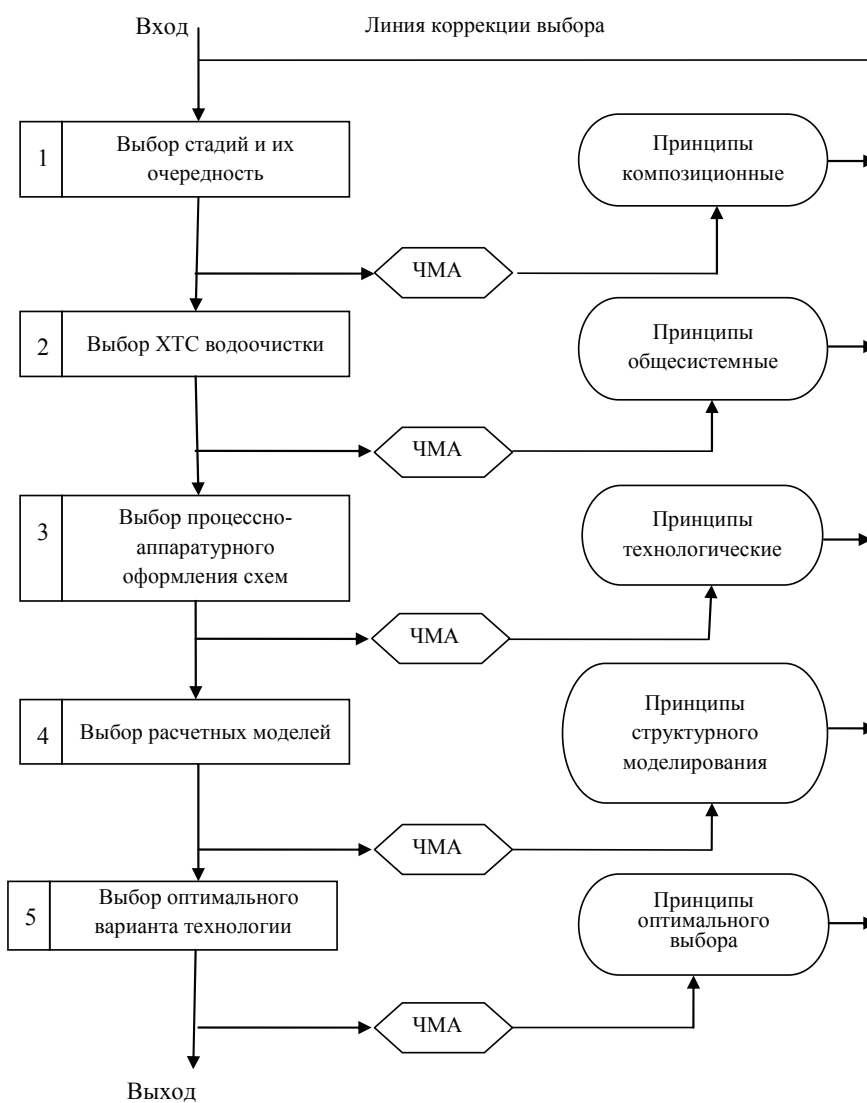


Рис. 4. Алгоритм генерации проектных решений в процессе разработки водоочистной технологии

К особенностям предлагаемого алгоритма следует отнести:

- 1) эволюционность творческого процесса – в смысле поэтапного нарастания сложности выбора проектных решений;
- 2) систематическое проведение человеко-машинного анализа (ЧМА) вариантов структурно-технологических решений;
- 3) использование апробированных принципов или «правил» действий на каждом этапе выбора решений;
- 4) наличие обратных связей, позволяющих откорректировать (согласовать между собой) результаты выбора решений, полученных на очередном и предыдущих этапах.

Особенностью данного алгоритма является и то, что постановка задачи об оптимальном проектировании технологии возможна лишь после определения последовательности процессов очистки воды. Для нее приходится наработать возможные варианты схем с аппаратурным оформлением, создавать их математическое описание и лишь с учетом этого ставить задачу о выборе наилучшей, в смысле принятого критерия, водоочистной технологии. Из сказанного следует, что структурные или топологические проблемы проектирования доминируют над всеми прочими, свидетельствуя в пользу применения методов структурного анализа и синтеза сложных ХТС.

Под структурным моделированием будем понимать процесс построения технологической схемы на основе процедур последовательного выбора: количества и типа стадий очистки воды; способов их взаимного соединения; определения функциональных возможностей стадий (эффективности); состава процессов и аппаратов; типовых расчетных методик. Поскольку рассматриваемый процесс плохо формализуем и носит экспертный характер, ключевую роль в нем играют принципы выбора решений, варианты которых рождаются в ходе проведения ЧМА.

Рассмотрим эти принципы более детально, в соответствии с этапами работы алгоритма. Так, следуя выводам работы [7], все методы очистки загрязненной воды удобно разделить на три группы, основанные:

- 1) на выделении примесей без изменения их химических свойств;
- 2) превращении примесей;
- 3) использовании биохимических методов.

Первая группа методов делится на две подгруппы:

- а) непосредственного выделения примесей из воды, куда относятся:
 - механическое удаление крупных примесей (на решетках, ситах);
 - микропроцеживание;
 - отстаивание и осветление;
 - применение гидроциклонов;
 - центрифугирование;
 - фильтрование;
 - флотация;
 - электрофорез;
 - мембранные методы (ультра- и нанофильтрация, обратный осмос, электродиализ);
- б) изменения фазового состояния воды или примеси с последующим их разделением в зависимости от характера фаз, которые образуют вода и примесь.

Существуют следующие ситуации.

Ситуация I. Примесь – газовая фаза; вода – жидкая фаза:

- дегазация;
- отгонка;
- выпаривание.

Ситуация II. Примесь – жидкая или твердая фаза; вода – газовая фаза:

- выпаривание.

Ситуация III. Примесь и вода жидкие, несмешивающиеся фазы:

- коалесценция;
- экстракция.

Ситуация IV. Примесь – жидкая фаза; вода – твердая фаза:

- вымораживание.

Ситуация V. Примесь – твердая фаза; вода – жидкая фаза:

- кристаллизация;
- сорбция;
- коагуляция.

Методы превращения примесей с изменением их химического состава разделяются по характеру происходящих процессов на следующие под-группы:

- труднорастворимые электролиты;
- малодиссоциированные соединения;
- комплексные соединения;
- синтез и разложение;
- окислительно-восстановительные процессы, включая электрохимические;
- термолиз.

Биохимические методы составляют особую группу, включающую физико-химические и микробиологические способы очистки. В том числе очистку активным смешанным илом и монокультурами.

Анализируя состав и физико-химические свойства примесей, содержащихся в загрязненной воде, проектировщику необходимо составить перечень таких свойств, различия в которых могут стать основной для выделения загрязняющих веществ. Так, например, для дисперсных систем отличительными свойствами могут оказаться частицы разного размера, плотности, гидрофобности и т.д. Существующие в литературе рекомендации значительно упрощают задачу выбора искомым свойств в конкретных ситуациях [7, 8, 13].

Поскольку любое свойство из составленного перечня будет принадлежать одной из трех групп методов очистки, становится очевидным наименование стадий очистки, доступна эскизная проработка схемы их соединений и примерный тип процессов, обеспечивающих очистку. Принимая во внимание обсуждение графиков (см. рис. 3) и рекомендации работы [8], сформулируем систему *композиционных принципов*, базирующихся на знании состава веществ в очищаемой воде.

Принцип 1: различие в свойствах примесей является ключевым фактором в разделении смесей – перечень различий в свойствах примесей позволяет определить возможные сочетания стадий очистки.

Принцип 2: при синтезе схемы водоочистки полезно руководствоваться правилом «от простого к сложному» – возможно, что часть примесей эффективно и быстро удаляется из смеси уже на начальных стадиях очистки и с меньшими затратами.

Принцип 3: первой удаляется примесь, преобладающая по массе, – процесс очистки организуется так, чтобы поток загрязняющих веществ постепенно сокращался.

Принцип 4: процесс очистки безопаснее и дешевле вести при нормальных условиях – изменения температуры и давления в аппаратах приводят к росту затрат на очистку.

Принцип 5: не добавлять химические и иные «активаторы» в процесс очистки, если на это нет особых причин – дополнительные вещества и энергетические воздействия приводят к росту отходов и к дополнительным затратам.

Принцип 6: в системах водоочистки необходимо предусмотреть меры технологической и экологической безопасности – необходимо исключить срыв технологических режимов и возможность заражения людей за счет введения специальных мер защиты.

Число стадий и гипотетические способы их взаимного соединения являются исходными данными для синтеза топологической структуры ХТС на этапе 2 реализации алгоритма (см. рис. 4). При этом используется эвристическое программирование, позволяющее проектировать и строить наиболее рациональные варианты схем без полного перебора всех возможных альтернатив. Заметим при этом, что формирование структуры не определяет систему водоочистки в целом, а лишь характеризует ее конфигурацию. И в этом процессе синтеза ключевую роль играют способы возможного соединения стадий между собой – параллельного, последовательного, встречно-параллельного, с рециклом и байпасом.

Выбор лучших вариантов схемных решений зависит от их структурной сложности (числа стадий, разветвленности технологических связей, степени взаимодействия). В качестве меры сложности рассматриваемой системы выберем степень различия свойств разделяемых примесей. А в качестве принципов рационального выбора структуры ХТС – аксиомы системной сложности [9].

Обозначим $\gamma(S)$ – выбранную меру сложности для системы водоочистки S . Тогда набор *общесистемных принципов* сформулируем следующим образом.

Принцип 1: любая подсистема не может быть сложнее системы в целом.

То есть $\gamma(S_i) \leq \gamma(S)$, где S_i – подсистема, $i = \overline{1, k}$.

Принцип 2: при параллельном соединении сложность системы оценивается наивысшей сложностью ее подсистем.

Пусть $S = S_1 \oplus S_2 \oplus \dots \oplus S_k$, где \oplus – знак параллельного соединения подсистем S_i , $i = \overline{1, k}$. Тогда $\gamma(S) = \max_{1 \leq i \leq k} \gamma(S_i)$

Принцип 3: при последовательном соединении сложность системы не превышает суммы сложностей подсистем.

Пусть $S = S_1 \otimes S_2 \otimes \dots \otimes S_k$, где \otimes – знак последовательного соединения подсистем S_i , $i = \overline{1, k}$. Тогда $\gamma(S) \leq \gamma(S_1) + \gamma(S_2) + \dots + \gamma(S_k)$.

Принцип 4: при наличии обратной связи между подсистемами сложность параллельного соединения не превышает сложности их встречно-параллельного соединения.

Пусть \oplus – знак операции замыкания обратной связи. Тогда $\gamma(S_i \oplus S_{i+1}) \leq \gamma(S_i) + \gamma(S_{i+1}) + \gamma(S_{i+1} \oplus S_i)$.

Если принятую меру сложности выразить через стоимость ее технологической реализации, тогда обоснование выбора вариантов топологии ХТС водоочистки будет дано в денежном эквиваленте.

Располагая вариантами схем водоочистки необходимо «наполнить» их технологическим содержанием – подобрать для каждой стадии соответствующее процессно-аппаратурное оформление. Для этого будем использовать те знания, которые были приобретены на этапе 1 реализации алгоритма (речь идет о закреплении методов очистки за каждой стадией, см. рис. 4).

В таком случае задача выбора процессно-аппаратурного оформления должна решаться из соображений эффективности работы очистного оборудования, его стоимости и простоты обслуживания. Для удобства ее решения следует использовать аналоги – типовые конструкции аппаратов, характеристики которых детально описаны в литературе [13]. В число нужных характеристик попадает и описание процессов, свойственных выбранному типу оборудования.

Принципы построения сложных ХТС разработаны академиком В.В. Кафаровым [10]. На рисунке 5 они сведены в блочно-иерархическую диаграмму: сложные процессы рассматриваются как состоящие из индивидуальных блоков или подсистем, позволяющих описывать их поэлементно, а затем агрегировать в единое целое. На этом основании сформулируем *технологические принципы*, полезные при выборе процессно-аппаратурного оформления систем водоочистки.

Принцип 1: выбор метода очистки фиксирует тип аппарата и ту совокупность процессов, на основании которых он разработан.

Принцип 2: спецификация процессов базируется на принципе блочно-иерархической организации.

Принцип 3: любой процесс химической (биохимической) технологии допускает разложение на элементарные составляющие (подпроцессы).

Полезность этих принципов становится очевидной на этапе 4 реализации алгоритма (см. рис. 4). Для проектировщиков его значимость заключается в выборе адекватного математического описания полученных вариантов схемных решений.

Существуют типовые (инженерные) методики расчета оборудования и более сложные – на основе математических моделей. Выбор метода зависит от многих обстоятельств: постановки решаемой задачи, доступности экспериментальных данных, знания констант и т.д. Типовые методики чаще всего используются для расчета статических характеристик процессов, тогда как математические модели пригодны для расчетов статических и динамических режимов.

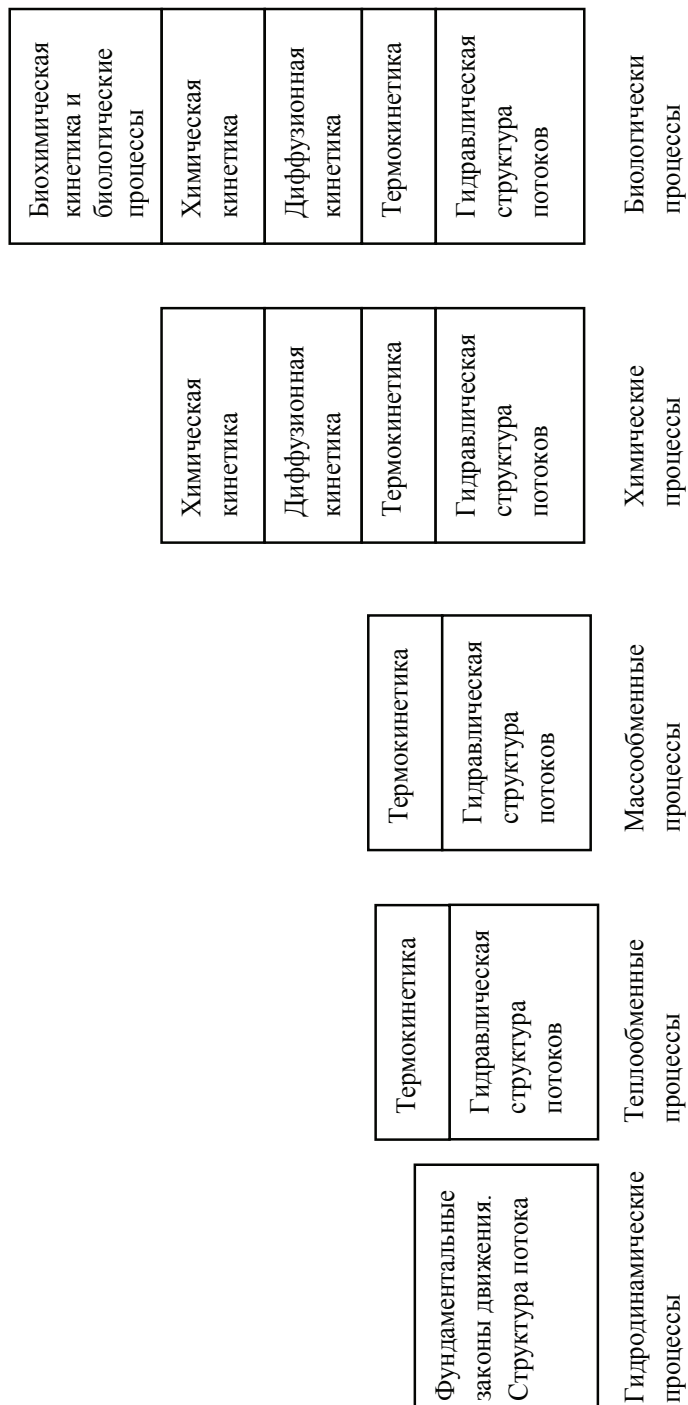


Рис. 5. Блочная структура типовых процессов

Опираясь на блочно-иерархический принцип разработки математических моделей, можно выделить систему уравнений, входящих в состав математического описания стадий водоочистки:

- 1) уравнения материально-энергетических балансов, записанные с учетом возможной гидродинамической структуры потоков в аппаратах;
- 2) уравнения «элементарных» процессов, описывающие физико-химическую сущность процессов тепло- и массопереноса, кинетику химических или ферментативных реакций и т.д.;
- 3) соотношения для переменных состояния процесса и констант, полученные теоретическим или эмпирическим способами;
- 4) ограничения на изменение переменных состояния процессов (диапазоны применимости модели).

Для решения задач параметрической идентификации и проверки моделей на адекватность используются расчетные и экспериментальные данные, полученные соответственно на основе уравнений модели и реально работающем оборудовании. Так как экспериментальная информация на стадии проектирования технологии и оборудования может отсутствовать, приходится использовать данные, полученные на лабораторных или полупромышленных аппаратах.

Поскольку вариантов технологических схем может оказаться несколько, потребуется значительное время на выполнение нужных расчетов и сравнений. По этой причине типовые технологические операторы (такие как осаждение, разделение, флотация, биоочистка, адсорбция, сепарация) можно представить в виде модулей с соответствующим символьным отображением.

В качестве примера покажем возможную комбинацию стадий водоочистки (рис. 6).

Такая наглядность не только способна облегчить задачу структурного моделирования технологии для проектировщиков, но с использованием специальных языков моделирования будет удобно обсчитывать любые сочетания модулей, входящих в технологическую схему водоочистки.

На основе вышесказанного сформулируем ряд *принципов структурного моделирования*, необходимых при выборе расчетных методик стадий водоочистки.

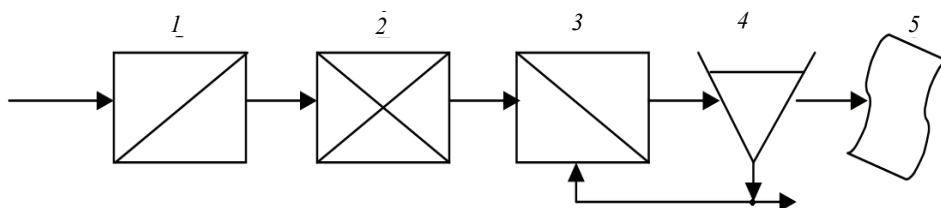


Рис. 6. Символьное отображение технологии:
1 – песколовка; 2 – первичный отстойник; 3 – аэротенк;
4 – вторичный отстойник; 5 – водоем-приемник

Принцип 1: возможности проектируемой водоочистной системы исследуются не с помощью реальных технологических или биохимических операторов, а с применением математических моделей, изоморфных им в плане изучаемых свойств.

Принцип 2: математическое моделирование химико-технологических и биохимических систем базируется на блочно-иерархической организации процессов.

Принцип 3: расчет возможных вариантов организации технологии водоочистки производится на основе однородных и равноточных моделей.

Принцип 4: процесс структурного моделирования завершается построением технологической схемы с использованием типовых модулей и специального языка моделирования.

Последний этап работы алгоритмов (см. рис. 4) связан с выбором наилучшего, в некотором смысле, проекта технологической схемы ω^* из множества допустимых вариантов Ω , полученных на этапах 1–4. В качестве критерия выбора может использоваться критерий приведенных затрат $Q = Q(V, R)$, состоящий из суммы единовременных V и эксплуатационных R расходов, отнесенных на время реализации проекта. Единовременные затраты можно оценить, исходя из рыночных цен на аналогичные типы водоочистного оборудования, тогда как эксплуатационные расходы по каждому варианту $\omega \in \Omega$ надо рассчитывать по имеющимся математическим моделям технологий.

Поскольку процессы водоочистки рассматриваются как многостадийные, то для исследования эффективности их работы и расчета эксплуатационных расходов может быть использован метод динамического программирования [11]. Согласно идее этого метода выбор режимов работы каждой стадии должен производиться в интересах всей технологической цепочки. И с учетом этого назовем *принципом оптимального выбора* технологии водоочистки принцип метода динамического программирования, сформулированный Р. Беллманом.

Принцип 1: оптимальная стратегия управления многостадийным процессом обладает тем свойством, что каковы бы ни были начальные состояния $x^{(0)}$ и управление на первой стадии $u^{(1)}$, последующие управления на всех стадиях $u^{(i)}$, $i = \overline{2, k}$, должны составлять оптимальную стратегию u_{k-1} относительно состояния $x^{(1)}$ первой стадии, определенного начальным состоянием процесса $x^{(0)}$ и управлением на первой стадии $u^{(1)}$. Здесь x – вектор переменных состояния, включающий концентрации примесей, температуру, давление, рН среды и др.; u – вектор управления (расходы, давление, коэффициенты рециркуляции и т.д.).

В приведенной формулировке под оптимальной стратегией u_{k-1} понимается стратегия управления многостадийным процессом, включающим $k-1$ последних стадий, придающая критерию

$$Q_{k-1} = \sum_{i=1}^k q_i(x^{(i-1)}, u^{(i)}),$$

оптимальное значение, где q_i – критерий оценки затрат i -й стадии.

В заключение заметим, что практическое применение структурного моделирования предполагает выполнение большого объема работ по созданию баз данных по загрязняющим веществам и их физико-химическим свойствам, типовым методам расчета процессов водоочистки, конструкциям аппаратов и т.д. Принципиально важным моментом является в этой работе и подготовка программного обеспечения, способного поддерживать процесс принятия проектных решений.

Список литературы

1. Очистка природных и сточных вод. Ч. 1 : Промышленное водоснабжение. Очистка и повторное использование сточных вод : учеб. пособие / под общ. ред. В.И. Аксенова. – Тамбов : ИП Чесноков А.В., 2011. – 168 с.
2. Булатов, М.А. Комплексная переработка многокомпонентных жидких систем. Теория и техника управления образованием осадков / М.А. Булатов. – М. : Мир, 2004. – 304 с.
3. Проскуряков, В.А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В.А. Проскуряков, Л.И. Шмидт. – Л. : Химия, 1997. – 464 с.
4. Промышленное применение мембранных процессов : учеб. пособие / под общ. ред. Ю.Т. Панова, А.А. Поворова, Н.С. Попова. – Тамбов : ИП Чесноков А.В., 2011. – 82 с.
5. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Кн. 1 : Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М. : Наука, 1976. – 500 с.
6. Кафаров, В.В. Моделирование биохимических реакторов / В.В. Кафаров, А.Ю. Винаров, Л.С. Гордеев. – М. : Лесн. пром-сть, 1979. – 370 с.
7. Покровский, В.Н. Подготовка воды и очистка сточных вод / В.Н. Покровский, Е.П. Аракчеев // Итоги науки и техники. Сер. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. – 1978. – Т. 2. – С. 102.
8. Бертокс, П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений : пер. с англ. / П. Бертокс, Д. Радд. – М. : Мир, 1980. – 606 с.
9. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы : пер. с англ. / Дж. Касти. – М. : Мир, 1982. – 216 с.
10. Кафаров, В.В. Принципы создания безотходных химических производств / В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1982. – 288 с.
11. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М. : Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.
12. Дынкин, Е.Б. Теоремы и задачи о процессах Маркова / Е.Б. Дынкин, А.А. Юшкевич. – М. : Наука, 1967. – 232 с.
13. Тимонин, А.С. Инженерно-экологический справочник / А.С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – Т. 2. – 884 с.

**Development of Methodology of Structural Modeling
for Designing Treatment Technology
of Contaminated Water and Extraction of Sediment**

**N.S. Popov, A.V. Kozachek,
A.V. Svyatenko, Tran Minh Chinh**

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: water treatment; principles of design; structural modeling; technology.

Abstract: The paper describes an algorithm for structural modeling of treatment processes necessary for forming the image of processing scheme. The algorithm is based on the following principles: composition, system-wide, technology, structural modeling and best choice.

© Н.С. Попов, А.В. Козачек,
А.В. Святенко, Чан Минь Тьинь, 2012