

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЕРЕВОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Штепа В.Н., Дубина А.В.

УО «Белорусский государственный технологический университет» (г. Минск, РБ)

кафедра промышленной экологии

e-mail: shtepa.v@belstu.by

Штепа В.Н., Дубина А.В. Функциональное моделирование экологически безопасного водопотребления деревоперерабатывающих предприятий. Оценена экологическая опасность сточных вод деревоперерабатывающих предприятий, прежде все в контексте наличия в них формальдегида, который представляет крайне высокую опасность для активного ила биологических коммунальных очистных сооружений и, таким образом, выступает источником значительного экологического риска для природных водных объектов. На основе использования методологии IDEF0, поэтапной декомпозиции контекстной диаграммы, получена функциональная модель сквозного сегментного процесса («подготовка воды для мытья узлов и агрегатов» – «мытьё оборудования» – «управление накоплением стабилизированных сточных вод» – «многостадийная комплексная очистка сточных вод»), что дало возможность выделить две подсистемы единой информационной системы интеллектуального мониторинга: «Водопользование» и «Локальные очистные сооружения». Полученные результаты обосновано применить для дальнейшего синтеза информационно-аналитического модуля поддержки управления экологической и технико-экономической эффективностью водопользования деревоперерабатывающих предприятий. С целью детализации причинно-следственных связей была создана и проанализирована когнитивная карта процессов водопользования, водоотведения и очистки сточных вод.

Ключевые слова: функциональное моделирование, когнитивная карта, формальдегидсодержащие сточные воды, водоотведение, система поддержки принятия решений.

Введение

На деревообрабатывающих предприятиях в значительных количествах используют карбамидоформальдегидные и фенолформальдегидные смолы. В процессе их производства и применения образуются сточные воды (СВ) и опасные отходы, содержащие формальдегид, метанол, фенол, олигомерные и полимерные продукты, входящие в состав карбамидоформальдегидных смол [1]. Водные растворы, включающие в значительных количествах формальдегид, не могут отводиться в канализационные сети населенных пунктов или сбрасываться в природные водоёмы без очистки. Так как в силу высокой концентрации токсинов, такие сточные воды представляют значительную экологическую опасность: не только когда сбрасываются в природные водные объекты самим предприятием (прямое негативное влияние), но и когда направляются в коммунальные водоотводящие сети (опосредствованное негативное влияние). Второе базируется на том, что формальдегид даже в минимальных концентрациях крайне негативно воздействует на микробиоценоз активного ила (АИ) биологических коммунальных очистных сооружений (КОС) [2] и может вызвать его гибель (или значительное снижение эффективности удаления им загрязнителей), а соответственно и большие экологические риски по цепочке «промышленные предприятия» – «водоотводящая сеть населённого пункта» – «КОС» – «геоэкосистема».

Ситуация усложняется тем, что эффективных способов редукации поллютантов формальдегидсодержащих сточных вод деревоперерабатывающих предприятий, долговременно

используемых на реальных объектах, относительно небольшое количество – все они представляют собой комбинированные решения и требуют строгого соблюдения научно обоснованных требований по их эксплуатации. При этом показатели качества загрязнённых водных растворов не являются постоянными, а нелинейно, стохастически, с высокими амплитудными значениями изменяются [3] – нарушая ранее определённые стационарные параметры и режимы водообработки.

Всё вышеописанное требует использование современных подходов к управлению процессами, которые основываются на критериях наилучших доступных технологий (НДТ).

Подходы НДТ при оценке технологий локальных очистных сооружений деревоперерабатывающих предприятий

При этом концепция наилучших доступных технологий и технологических показателей НДТ представляет собой основу технологического нормирования в сфере охраны окружающей среды. Как правило, технологические показатели устанавливаются в процессе отраслевого сравнительного анализа экологической эффективности таким образом, чтобы стимулировать предприятия к эколого-технологической модернизации. Поэтому критерий применяемый в Российской Федерации «Наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги либо другие предусмотренные международными договорами показатели», активно используемый разработчиками отраслевых информационно-технических справочников, в случае ИТС 8 трансформировался в вариант «Снижение негативного воздействия на окружающую среду загрязняющих веществ, для очистки сточных вод от которых применяется данное технологическое решение».

Критерий «Экономическая эффективность внедрения и эксплуатации» технологии определяется ее распространенностью, так как именно факт использования конкретных подходов для очистки производственных сточных вод до уровней, соответствующих требованиям НДТ (или другим применимым требованиям), свидетельствует о том, что затраты на внедрение и эксплуатацию технологии приемлемы для предприятий различных отраслей промышленности.

Критерий «Промышленное внедрение этой технологии на двух и более объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду» нашел применение при актуализации справочника, так как, как уже отмечено, в ИТС 8 приведена информация о тех решениях, которые уже нашли практическое применение на различных российских предприятиях, отнесенных к областям применения НДТ.

Критерий «Период внедрения» предусматривает учет характерных для различных отраслей промышленности периодов времени, в течение которых происходит обновление технологического оборудования и даже самих технологий производства тех или иных видов продукции. В части внедрения новых методов очистки сточных вод речь может идти об учете таких факторов, как, например, сравнительно недавняя (и затратная) реконструкция очистных сооружений на конкретном предприятии.

Учет критерия «Применение ресурсо- и энергосберегающих методов» получил наибольшее отражение при выборе НДТ управленческого характера, так как цели, задачи и планируемые показатели повышения ресурсной и энергетической эффективности формируются в рамках развития соответствующих систем менеджмента (48 ИТС 8–2022).

Таким образом, в рамках задач водопользования деревоперерабатывающих производств ключевым становится обеспечение адекватного и оперативного контроля экологических параметров процессов с возможностью прогнозирования развития технологической ситуации.

Функциональная модель информационной системы экологического менеджмента водопользования деревоперерабатывающего предприятия

В рамках формализации задачи контроля водопользования деревоперерабатывающих

производств информационной системой используется методологии IDEF0. Такой стандарт представляет объект, как набор модулей; описание выглядит как «чёрный ящик» с входами, выходами, управлением и механизмом, который постепенно детализируется до необходимого уровня. Концепт методологии IDEF0 описан в рекомендациях Р 50.1.028-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования». На основе технологического анализа [3, 4] выбраны следующие категории параметров (согласно терминологии IDEF0) (рис. 1):

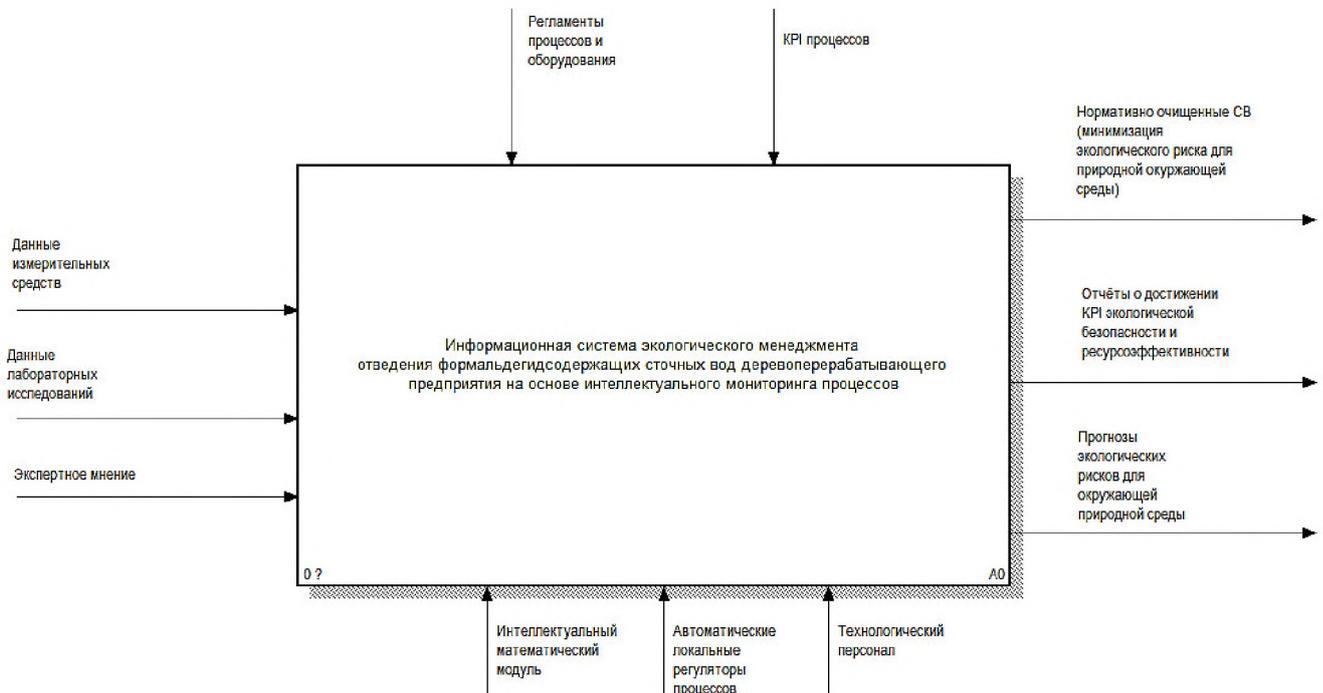


Рисунок 1 – Контекстная диаграмма информационной системы экологического менеджмента отведения формальдегидсодержащих сточных вод, включая их очистку, деревоперерабатывающего производства

- входящие факторы (данные поступают от измерительных средств, лабораторных исследований, экспертных заключений);
- управляющие факторы: регламентные требования (включая предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязнителей в СВ), KPI процессов (целевые показатели);
- механизмы, обеспечивающие протекание процессов, в том числе информационная поддержка: интеллектуальный математический аппарат, автоматические локальные регуляторы, технологический персонал;
- результаты: нормативно очищенные СВ, отчёты о достижении KPI экологической безопасности и ресурсоэффективности, прогнозы экологических рисков для окружающей природной среды.

Следующим шагом стала первичная декомпозиция контекстной диаграммы (см. рис. 1), результатом которой стало получение двух подсистем единой информационной системы интеллектуального мониторинга процессов использования, отведения и очистки на локальных очистных сооружениях (ЛОС) (рис. 2):

- подсистемы водопользования (в нашем случае идёт речь о мониторинге параметров мытья оборудования, на котором выполнялись производственные операции и с которого смываются частицы формальдегидных смол, загрязняя подающееся водные растворы);
- подсистемы ЛОС.

При этом технологической задачей контроля подсистемы водопользования является минимизация колебаний параметров СВ – получение на входе ЛОС максимально стабилизированных по расходу и показателям качества формальдегид содержащих сточных вод, что

значительно повысит технологическую, а соответственно и экологическую эффективность редукации поллютантов.

Таким образом концептуально разграничены причинно-следственные взаимосвязи (см. рис. 2) между водопользованием (параметры мытья узлов и агрегатов) и очисткой СВ на ЛОС [5].

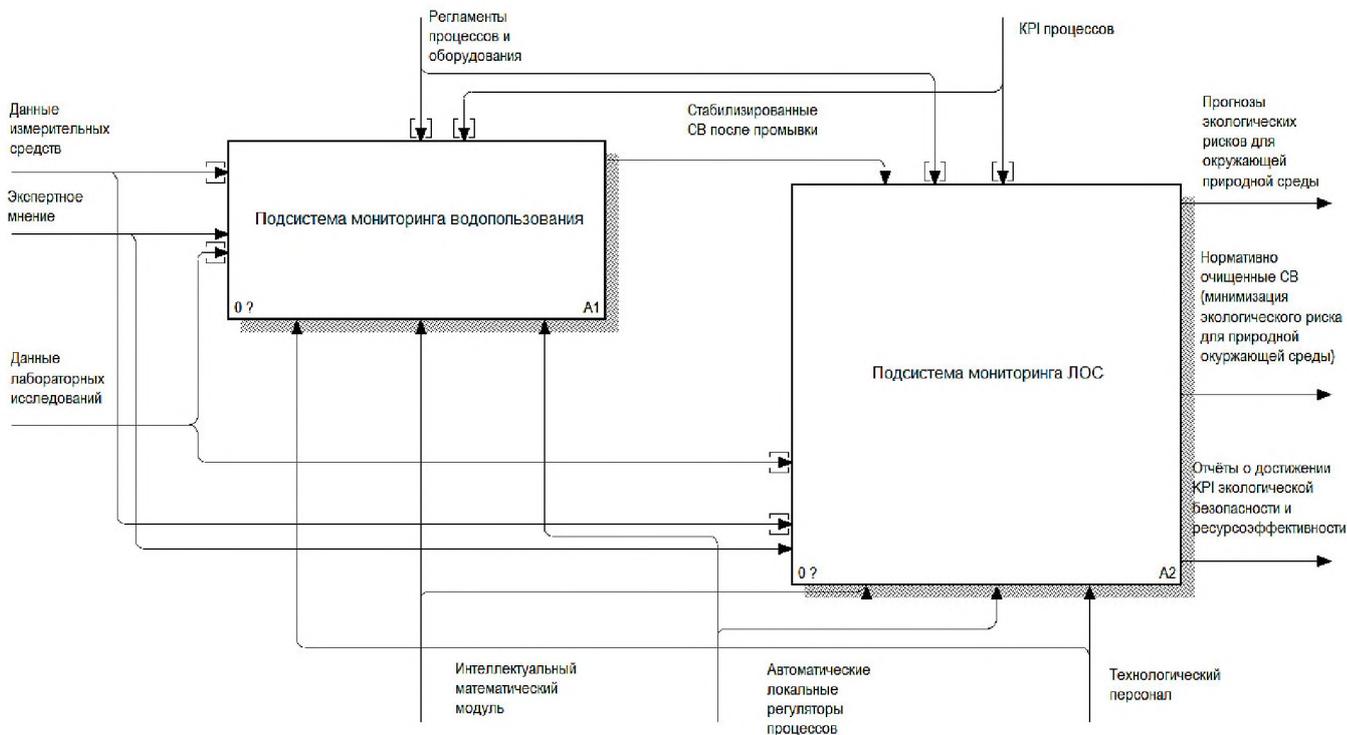


Рисунок 2 – Декомпозиция контекстной диаграммы информационной системы экологического менеджмента отведения формальдегидсодержащих сточных вод, включая их очистку, деревоперерабатывающего производства

Функциональные модели подсистем информационной системы экологического менеджмента водопользования деревоперерабатывающего предприятия

Дальнейшая декомпозиция подсистем мониторинга водопользования и локальных очистных сооружений представила поэлементную детализацию технологических параметров [6] и структуры протекания процессов:

- подготовки воды для промывки (рис. 3);
- промывки и формирования, собственно, самих формальдегидсодержащих сточных вод (см. рис. 3);
- управления накоплением стабилизированных формальдегидсодержащих сточных вод, включая поступление их от абсорбционно-биохимических установок (АБХУ) очистки воздуха и от пропарочных ванн (рис. 4);
- предварительной химической очистки (см. рис. 4) с вакуум-фильтрацией и кондиционированием;
- основной деструктивной очистки с использованием передовых окислительных процессов (AOPs) на основе оптимизированного процесса Фентона (см. рис. 4);
- сорбционной доочистки и обеспечения окончательного нормативного качества СВ по показателям «Химическое потребление кислорода» (ХПК) и «Концентрация формальдегида» (см. рис. 4).

По интегральным показателям сквозного сегментного процесса водопользования («подготовка воды для мытья узлов и агрегатов» – «мытьё оборудования» – «управление накоплением стабилизированных СВ» – «многостадийная комплексная очистка СВ») формируются отчёты достижения экологической безопасности и технико-экономических целей

процесса водопользования (цифровой ресурсный паспорт [7]), выполняется прогнозирование протекание процессов (в том числе в режиме реального времени) с ориентацией на превентивное предотвращение антропогенных чрезвычайных ситуаций, в том числе в результате гибели АИ на КОС.

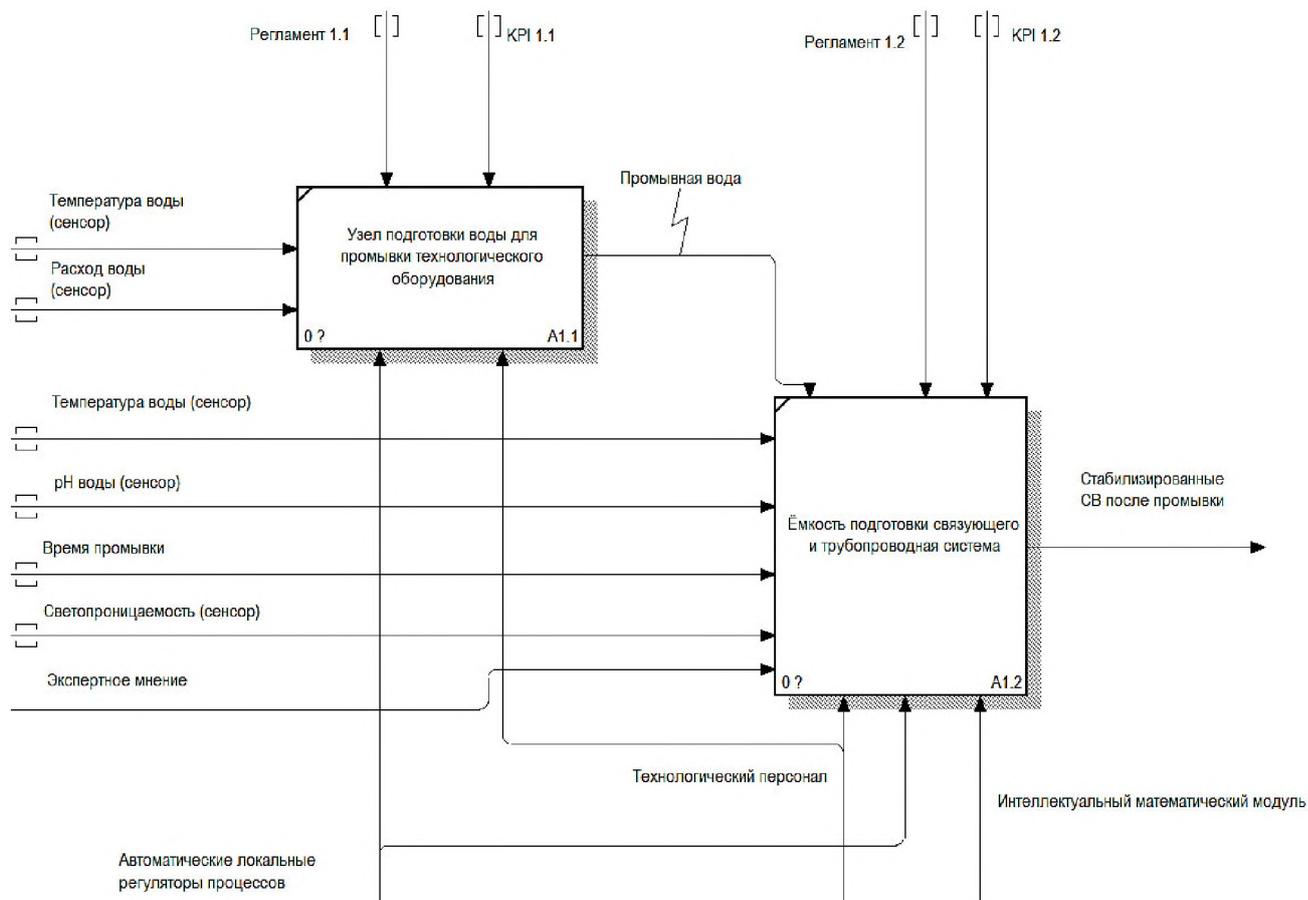


Рисунок 3 – Декомпозиция подсистемы мониторинга водопользования

Последствия для очистных сооружений:

- Снижение качества очистки: ухудшается удаление органических загрязнений и других загрязняющих веществ.
- Затраты на реабилитацию: в случае сильного отравления ила может потребоваться его замена или длительная реабилитация для восстановления его биологической активности.
- Важность контроля: для предотвращения негативного влияния формальдегида необходим контроль его концентрации в сточных водах, поступающих на очистные сооружения, особенно от промышленных предприятий, использующих этот реагент.

Детализация причинно-следственных связей процессов отведения и очистки сточных вод с применением когнитивных карт

Моделирование с помощью когнитивных карт – метод анализа и представления сложных, слабоструктурированных систем с помощью графовых моделей, где узлы представляют собой базисные факторы, а направленные стрелки – причинно-следственные связи с указанием характера воздействия. Этот метод позволяет структурировать информацию, выявить ключевые факторы и их взаимовлияние для достижения целей управления или принятия решений [8]. Когнитивная карта представляет собой графическое представление субъективных представлений о сложной системе, включая ее ключевые элементы (базисные факторы) и связи между ними. Моделирование с их помощью предназначено для анализа сложных, слабоструктурированных объектов, таких как промышленно-коммунальное водопользование.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЕРЕВОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Штепа В.Н., Дубина А.В.

УО «Белорусский государственный технологический университет» (г. Минск, РБ)

кафедра промышленной экологии

e-mail: shtepa.v@belstu.by

Штепа В.Н., Дубина А.В. Функциональное моделирование экологически безопасного водопотребления деревоперерабатывающих предприятий. Оценена экологическая опасность сточных вод деревоперерабатывающих предприятий, прежде все в контексте наличия в них формальдегида, который представляет крайне высокую опасность для активного ила биологических коммунальных очистных сооружений и, таким образом, выступает источником значительного экологического риска для природных водных объектов. На основе использования методологии IDEF0, поэтапной декомпозиции контекстной диаграммы, получена функциональная модель сквозного сегментного процесса («подготовка воды для мытья узлов и агрегатов» – «мытьё оборудования» – «управление накоплением стабилизированных сточных вод» – «многостадийная комплексная очистка сточных вод»), что дало возможность выделить две подсистемы единой информационной системы интеллектуального мониторинга: «Водопользование» и «Локальные очистные сооружения». Полученные результаты обосновано применить для дальнейшего синтеза информационно-аналитического модуля поддержки управления экологической и технико-экономической эффективностью водопользования деревоперерабатывающих предприятий. С целью детализации причинно-следственных связей была создана и проанализирована когнитивная карта процессов водопользования, водоотведения и очистки сточных вод.

Ключевые слова: функциональное моделирование, когнитивная карта, формальдегидсодержащие сточные воды, водоотведение, система поддержки принятия решений.

Введение

На деревообрабатывающих предприятиях в значительных количествах используют карбамидоформальдегидные и фенолформальдегидные смолы. В процессе их производства и применения образуются сточные воды (СВ) и опасные отходы, содержащие формальдегид, метанол, фенол, олигомерные и полимерные продукты, входящие в состав карбамидоформальдегидных смол [1]. Водные растворы, включающие в значительных количествах формальдегид, не могут отводиться в канализационные сети населенных пунктов или сбрасываться в природные водоёмы без очистки. Так как в силу высокой концентрации токсинов, такие сточные воды представляют значительную экологическую опасность: не только когда сбрасываются в природные водные объекты самим предприятием (прямое негативное влияние), но и когда направляются в коммунальные водоотводящие сети (опосредствованное негативное влияние). Второе базируется на том, что формальдегид даже в минимальных концентрациях крайне негативно воздействует на микробиоценоз активного ила (АИ) биологических коммунальных очистных сооружений (КОС) [2] и может вызвать его гибель (или значительное снижение эффективности удаления им загрязнителей), а соответственно и большие экологические риски по цепочке «промышленные предприятия» – «водоотводящая сеть населённого пункта» – «КОС» – «геоэкосистема».

Ситуация усложняется тем, что эффективных способов редукации поллютантов формальдегидсодержащих сточных вод деревоперерабатывающих предприятий, долговременно

используемых на реальных объектах, относительно небольшое количество – все они представляют собой комбинированные решения и требуют строгого соблюдения научно обоснованных требований по их эксплуатации. При этом показатели качества загрязнённых водных растворов не являются постоянными, а нелинейно, стохастически, с высокими амплитудными значениями изменяются [3] – нарушая ранее определённые стационарные параметры и режимы водообработки.

Всё вышеописанное требует использование современных подходов к управлению процессами, которые основываются на критериях наилучших доступных технологий (НДТ).

Подходы НДТ при оценке технологий локальных очистных сооружений деревоперерабатывающих предприятий

При этом концепция наилучших доступных технологий и технологических показателей НДТ представляет собой основу технологического нормирования в сфере охраны окружающей среды. Как правило, технологические показатели устанавливаются в процессе отраслевого сравнительного анализа экологической эффективности таким образом, чтобы стимулировать предприятия к эколого-технологической модернизации. Поэтому критерий применяемый в Российской Федерации «Наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги либо другие предусмотренные международными договорами показатели», активно используемый разработчиками отраслевых информационно-технических справочников, в случае ИТС 8 трансформировался в вариант «Снижение негативного воздействия на окружающую среду загрязняющих веществ, для очистки сточных вод от которых применяется данное технологическое решение».

Критерий «Экономическая эффективность внедрения и эксплуатации» технологии определяется ее распространенностью, так как именно факт использования конкретных подходов для очистки производственных сточных вод до уровней, соответствующих требованиям НДТ (или другим применимым требованиям), свидетельствует о том, что затраты на внедрение и эксплуатацию технологии приемлемы для предприятий различных отраслей промышленности.

Критерий «Промышленное внедрение этой технологии на двух и более объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду» нашел применение при актуализации справочника, так как, как уже отмечено, в ИТС 8 приведена информация о тех решениях, которые уже нашли практическое применение на различных российских предприятиях, отнесенных к областям применения НДТ.

Критерий «Период внедрения» предусматривает учет характерных для различных отраслей промышленности периодов времени, в течение которых происходит обновление технологического оборудования и даже самих технологий производства тех или иных видов продукции. В части внедрения новых методов очистки сточных вод речь может идти об учете таких факторов, как, например, сравнительно недавняя (и затратная) реконструкция очистных сооружений на конкретном предприятии.

Учет критерия «Применение ресурсо- и энергосберегающих методов» получил наибольшее отражение при выборе НДТ управленческого характера, так как цели, задачи и планируемые показатели повышения ресурсной и энергетической эффективности формируются в рамках развития соответствующих систем менеджмента (48 ИТС 8–2022).

Таким образом, в рамках задач водопользования деревоперерабатывающих производств ключевым становится обеспечение адекватного и оперативного контроля экологических параметров процессов с возможностью прогнозирования развития технологической ситуации.

Функциональная модель информационной системы экологического менеджмента водопользования деревоперерабатывающего предприятия

В рамках формализации задачи контроля водопользования деревоперерабатывающих

производств информационной системой используется методологии IDEF0. Такой стандарт представляет объект, как набор модулей; описание выглядит как «чёрный ящик» с входами, выходами, управлением и механизмом, который постепенно детализируется до необходимого уровня. Концепт методологии IDEF0 описан в рекомендациях Р 50.1.028-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования». На основе технологического анализа [3, 4] выбраны следующие категории параметров (согласно терминологии IDEF0) (рис. 1):

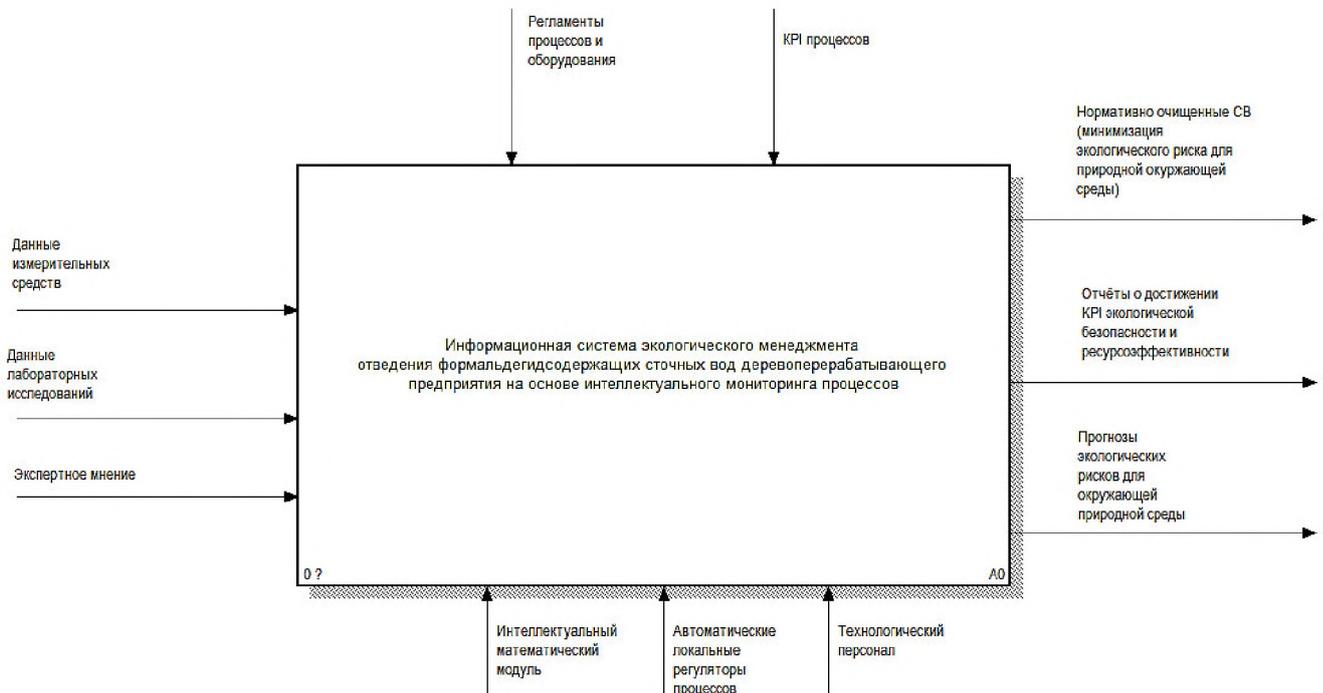


Рисунок 1 – Контекстная диаграмма информационной системы экологического менеджмента отведения формальдегидсодержащих сточных вод, включая их очистку, деревоперерабатывающего производства

- входящие факторы (данные поступают от измерительных средств, лабораторных исследований, экспертных заключений);
- управляющие факторы: регламентные требования (включая предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязнителей в СВ), KPI процессов (целевые показатели);
- механизмы, обеспечивающие протекание процессов, в том числе информационная поддержка: интеллектуальный математический аппарат, автоматические локальные регуляторы, технологический персонал;
- результаты: нормативно очищенные СВ, отчёты о достижении KPI экологической безопасности и ресурсоэффективности, прогнозы экологических рисков для окружающей природной среды.

Следующим шагом стала первичная декомпозиция контекстной диаграммы (см. рис. 1), результатом которой стало получение двух подсистем единой информационной системы интеллектуального мониторинга процессов использования, отведения и очистки на локальных очистных сооружениях (ЛОС) (рис. 2):

- подсистемы водопользования (в нашем случае идёт речь о мониторинге параметров мытья оборудования, на котором выполнялись производственные операции и с которого смываются частицы формальдегидных смол, загрязняя подающееся водные растворы);
- подсистемы ЛОС.

При этом технологической задачей контроля подсистемы водопользования является минимизация колебаний параметров СВ – получение на входе ЛОС максимально стабилизированных по расходу и показателям качества формальдегид содержащих сточных вод, что

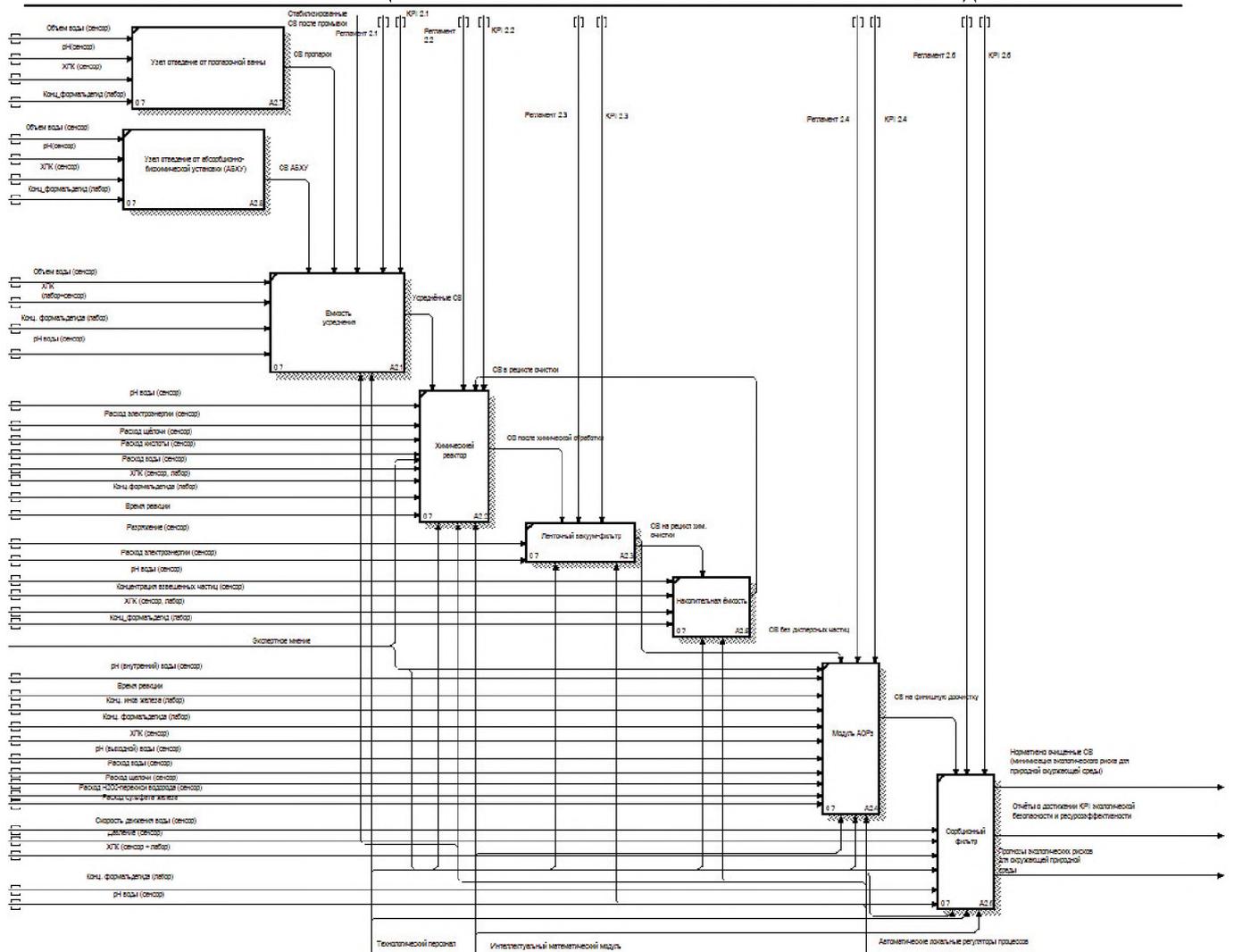


Рисунок 4 – Декомпозиция подсистемы мониторинга локальных очистных сооружений

Традиционные этапы создания когнитивной карты:

1. Определение целей и границ исследования: четко формулируется проблема, которую будет отражать карта, что задает масштаб и детализацию модели.
2. Сбор исходной информации: выявляются ключевые факторы, влияющие на изучаемый процесс, учитываются мнения экспертов и заинтересованных сторон.
3. Структурирование данных: элементы группируются по смыслу и значимости, формируется иерархия понятий.
4. Установление связей: определяются причинно-следственные отношения и взаимные влияния между элементами; каждая связь характеризуется направлением и силой воздействия.

Поскольку при функциональном моделировании получены структура и параметры создаваемой информационной системы, то целью применения когнитивной карты является оценить, как базовые факторы влияют друг на друга и на объект управления (рис. 5).

Анализ когнитивной карты (см. рис. 5) позволяет сформулировать следующие выводы, которые обязательно учесть при синтезе информационно-аналитических программных продуктов в контексте их функциональных целей:

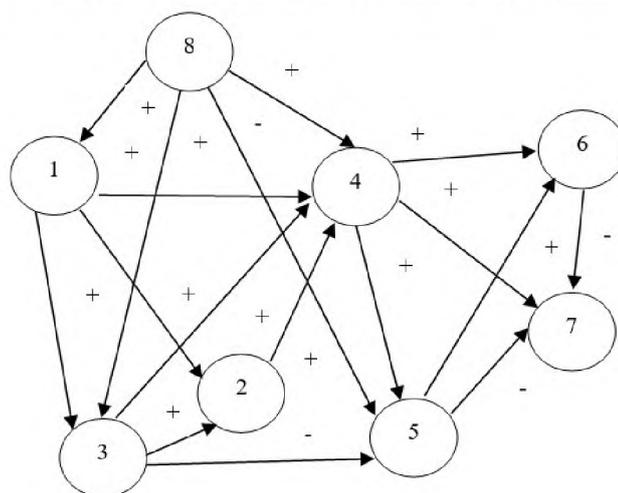


Рисунок 5 – Когнитивная карта процессов водопользования, отведения и очистки сточных вод:

- 1 – повышение профессиональных навыков сотрудников, 2 – стабилизация сточных вод перед очисткой, 3 – паспортные режимы работы оборудования, 4 – выполнения регламента очистки сточных вод, 5 – расход ресурсов, 6 – качество очистки сточных вод, 7 – достижение целевых ресурсно-экономических KPI, 8 – эффективная поддержка принятия решений

1. Эффективная поддержка принятия решения позволяет повысить не только качество очистки СВ, но и достичь плановых ресурсно-экономических показателей (при этом эффект, в результате косвенных воздействий, будет значительно выше, чем аддитивно определяемый); особенно выделяется положительное влияние на «Повышение профессиональных навыков сотрудников» – это единственное воздействие на него;

2. Опорным технологическим фактором является функционирование оборудования согласно паспортным характеристикам, и он имеет рациональное влияние (исходя из проектных задач) на выходные факторы – «Качество очистки СВ» и «Достижение целевых ресурсно-экономических KPI»;

3. Наиболее интегративными факторами (включают наибольшее количество входных дуг) выступают «Выполнение регламента очистки сточных вод» и «Расход ресурсов»; при этом первый в возрастающем тренде воздействует на второй.

Выводы

Оценка подходов НДТ демонстрирует целесообразность акцентирования внимания на приоритетности обеспечении адекватного и оперативного контроля экологических параметров процессов водопотребления деревоперерабатывающими производствами с возможностью прогнозирования развития экологической и технологической ситуаций.

Функциональное моделирование в методологии IDEF0 формирования, отведения и очистки формальдегид содержащих сточных вод в рамках сквозного сегментного процесса («подготовка воды для мытья узлов и агрегатов» – «мытьё оборудования» – «управление накоплением стабилизированных СВ» – «многостадийная комплексная очистка СВ») позволило выделить две подсистемы единой информационной системы интеллектуального мониторинга водопользования и ЛОС; с использованием когнитивной карты, на основе анализа причинно-следственные связи технологических взаимодействий, обосновано необходимость акцентированного влияния на повышение квалификации специалистов, работы оборудования в рамках паспортных параметров и выполнении регламента очистки сточных вод.

Дальнейшие исследования обосновано нацелить на создание информационно-аналитического модуля, который бы поддерживал цифровую трансформацию предприятий деревопереработки с нацеливанием на превентивное обеспечение экологической безопасно-