
МЕТОДЫ
ОПТИМИЗАЦИИ

ТАБЛИЦЫ СОБЫТИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ДОРОЖНОЙ КАРТЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

© 2015 г. О.Н. Кулешова, Н.Н. Веселитская, О.И. Карасев, А.В. Богомолова

(Москва)

В статье предложен комплексный подход к разработке дорожной карты, состоящий в совместном применении экспертного метода и вычислительных процедур. В частности, авторами представлены возможности применения таблиц событий для формирования дорожной карты в сфере очистки воды. Применение описанного авторами подхода позволяет выработать обоснованные стратегии инновационного развития различных предметных областей.

Ключевые слова: дорожная карта, таблицы событий, очистка воды.

Классификация JEL: C61, L6.

В процессе выполнения любого проекта экономические агенты сталкиваются с проблемой принятия инвестиционных решений. Для обоснования необходимости вложения средств в отдельный проект могут использоваться различные методы, к числу которых относится применение дорожных карт.

Дорожная карта – документ, который является графическим представлением вариантов стратегического развития предметной области на средне- и/или долгосрочную перспективу, включая показатели экономической эффективности. Впервые метод дорожных карт был применен в начале 1980-х годов в корпоративной практике. Впоследствии области его использования существенно расширились, охватив широкий круг направлений стратегического прогнозирования на отраслевом, региональном, общегосударственном и даже международном уровнях (Соколов, 2007).

Для получения и систематизации информации о предметной области при построении дорожной карты широко используются *экспертные процедуры*. Они могут дополняться различными методами обработки массивов количественных данных, для чего может применяться специальный инструментарий, в частности *табличные модели*.

Сочетание экспертных и вычислительных методов является одной из основных тенденций развития инструментария построения дорожных карт в последние годы (Porrer, 2008). В своей работе мы предлагаем комплексный подход к разработке дорожной карты, подразумевающий *совместное применение экспертного метода и вычислительных процедур*.

Наиболее распространенным подходом к построению дорожных карт является группировка содержащейся в карте информации по уровням. В настоящее время классическим механизмом, способным наглядно показать взаимосвязь между воплощением технологических решений в конкретном товаре или услуге, в бизнес-стратегиях и во внедрении этих возможностей на рынке, является классический подход к созданию дорожных карт Р. Фаала (Phaal, Farrukh, Probert, 2001). Дорожные карты, разрабатываемые при помощи данного подхода, включают три уровня деятельности компании (технологический; операционный, ориентированный на удовлетворение рыночного спроса и соответствие внешним условиям; а также промежуточный между ними уровень – продуктов и услуг), которые увязываются и располагаются совместно на единой временной шкале.

В процессе построения дорожной карты, связанной с развитием отдельной предметной области, изначально разрабатываются ее основные уровни. Дорожная карта, формируемая для опре-

деленной отрасли промышленности, может включать следующие уровни (Вишневский, Карасев, 2010):

- текущая ситуация в анализируемой области;
- цели и задачи;
- технологии;
- рынки.

Основу для формирования таких уровней составляет технологическая цепочка создания продукта в анализируемой области. При этом на каждом этапе технологической цепочки (научные исследования, опытно-конструкторские разработки, промышленное производство) необходимо принимать решения относительно целесообразности перехода к последующей ее стадии.

Математический инструментарий как раз позволяет на основе учета всей имеющейся информации (экспертной и др.) принимать решения о необходимости инвестирования средств в последующий этап технологического процесса. В частности, таблицы событий являются средством задания соответствия между значениями элементов некоторого конечного множества условий (событий), определяющих состояние предметной области, с последовательностями конечного множества действий (сценариями), определяющими реакцию на эти события.

Табличные модели были впервые предложены в 1957 г. в ходе совместного проекта компаний General Electric, Sutherland Corporation и BBC США, цель которого состояла в разработке систем хранения данных (King, 1959). Прикладные системы на основе табличных моделей стали появляться в 1960-е годы. В 1970 г. Канадская ассоциация стандартов (Canadian Standard Association, CSA) выпустила официальный стандарт по таблицам решений, применявшийся и в США (CSA Z243.1-1970..., 1970). В 1979 г. был принят европейский стандарт DIN66241, посвященный методам описания и обработки информации, в том числе с использованием таблиц решений (DIN 66241..., 1979). В 1980-е годы описанием методов таблиц решений также занималась специальная рабочая группа комитета CODASYL (CODASYL..., 1982).

Со временем область применения таблиц решений существенно расширилась, а тематика исследований сместилась в область разработки методик использования таких таблиц для представления знаний в интеллектуальных системах. К концу XX в. область применения этого инструментария стала весьма широкой. В основном она охватывает разработку экспертных систем для поддержки принятия решений (в том числе инвестиционных), программного обеспечения и систем управления. Таблицы решений также применяются для составления обучающих программ (Сметанин, 2009), манипулирования нечеткой информацией (Виноградов, Еремеев, 2009) и решения ряда других аналитических задач.

Язык таблиц решений относится к классу формальных языков и характеризуется непроецурной и наглядной формой описания процесса принятия решения, а также автоматизацией процессов проверки корректности (полноты, непротиворечивости, избыточности), оптимизации и трансляции табличной модели в программы поиска решений (Виноградов, Еремеев, 2009). Значительно облегчая внешний интерфейс, этот язык предоставляет собой мощный аппарат описания, моделирования и анализа различных предметных областей (Кулешова, Апраксин, 2011).

Предложенные авторами методы и средства языка таблиц событий включают средства использования не только внутреннего языка описаний, но и возможности использования естественных языков, что делает его вполне универсальным. Язык таблиц событий также позволяет применять графические представления информации.

Система на основе языка таблиц (Кулешова, Апраксин, 2011) событий дает возможность на начальных этапах сбора информации и проектирования проверять корректность описания исследуемой предметной области, предоставляет средства для моделирования реакций системы на различные ситуации, получение данных в процессе моделирования, а также анализа полученных результатов.

Язык таблиц событий (далее – ТС) позволяет задать набор правил (событий), определяющих конкретные последовательности действий, при заданных условиях $R = \{R_p\}; p = 1, \dots, n$ на основе пропозициональной логики над множеством условий $E = \{E_i\}; i = 1, \dots, m$ и действий

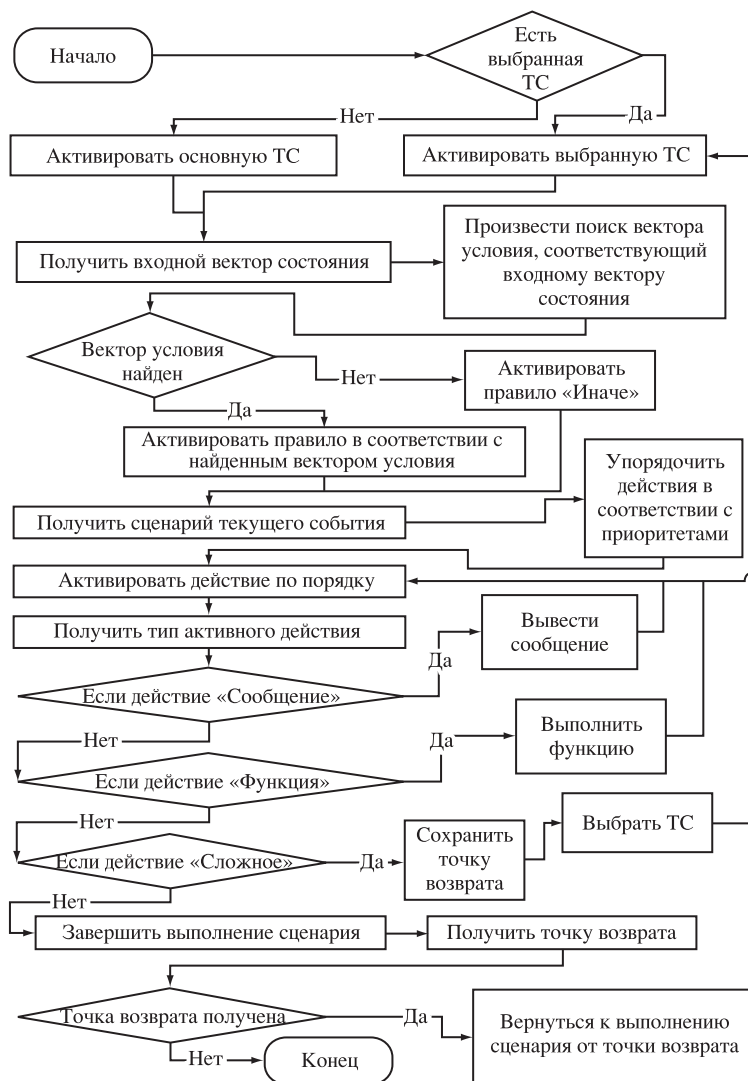


Рис. 1. Алгоритм моделирования систем таблиц событий

Источник: составлено автором.

$A = \{A_i\}; j = 1, \dots, k: (R_p)c_1^p \wedge c_2^p \wedge \dots \wedge c_m^p \Rightarrow A_1^p, \dots, A_k^p$. Множество условий и действий принимаются общими для всех правил в ТС. Такой набор правил может быть также представлен в табличной форме (Кулешова, 2012).

При активации сценария таблицы событий производится один из возможных переходов с последующим возвратом к исходной таблице, пока не будут выполнены все действия, предусмотренные сценарием. Далее будет выполнена операция возврата к таблице событий, из которой был произведен переход к текущей таблице событий. Исключение составляет прерывание, при котором будет осуществлен возврат к предыдущей таблице со сбросом всех текущих состояний (Кулешова, 2012).

Для корректно построенной таблицы событий должны выполняться следующие правила (Кулешова, 2012):

- 1) $\forall i, j [i \neq j \rightarrow C_i \cap C_j] = \emptyset$ – для обеспечения непротиворечивости (ортогональности);
- 2) $\forall i, j [i \neq j \rightarrow ((C_i \not\subset C_j) \wedge (C_j \not\subset C_i))]$, $\forall i, j [i \neq j \rightarrow C_i \neq C_j]$,
 $\forall i, j [i \neq j \rightarrow (P_i = P_j) \rightarrow (C_i \cup C_j)]$ – для обеспечения избыточности;

3) $\forall S, i, j \left((\exists R_i \vee \exists D_j) \left((S \rightarrow R_i) (S \rightarrow D_j) \right) \right)$ – для обеспечения полноты, где вектор $S = \{s_i\}, i = 1, \dots, m$, подающийся на вход таблицы событий;

4) $\forall i [A_i \neq 0] \neq \emptyset$ – обеспечение отсутствия неиспользуемых действий.

Моделирования систем таблиц событий (ТС) производится согласно алгоритму, представленному на рис. 1, где “Основная ТС” – это такая ТС, которая определяет основную цель системы, в нашем случае это “Анализ стоимости оборудования, применяемого для технологий водоочистки и водоподготовки в выбранном регионе”, “Выбранная ТС” – любая другая ТС в системе, для запуска моделирования части системы, например “Провести анализ и вычисление спроса”.

Далее покажем возможности применения метода таблиц событий для разработки дорожной карты в отрасли очистки питьевой воды для населения. Исходная информация для анализа представлена в дорожной карте “Использование нанотехнологий в сфере очистки питьевой воды для населения”, разработанной по заказу ОАО “РОСНАНО” (ОАО “РОСНАНО”, 2013). Данная дорожная карта была разработана с применением преимущественно экспертных процедур. В частности, она обобщает мнения 73 экспертов о нанотехнологиях и промежуточных продуктах, созданных на их основе, которые применяются в отрасли водоочистки и водоподготовки.

Карта отображает множество траекторий развития предметной области. При этом выбор оптимального пути развития из предложенных вариантов является непростой задачей, поскольку требует учета специфических особенностей объекта (например, региона или конкретного населенного пункта), для которого он осуществляется. По мнению авторов, инструментом поиска оптимального пути развития отрасли водоочистки является обработка информации, представленной в дорожной карте, при помощи таблиц событий. Выбор оптимального решения достигается за счет предоставления информации об исходах каждого рассматриваемого решения.

При этом стоит отметить, что выбор именно отрасли водоочистки в качестве предметной области исследования неслучаен. Он обусловлен рядом текущих проблем, обострившихся в данной области в России. К их числу относятся:

- загрязнение как поверхностных, так и подземных источников водоснабжения;
- существенный износ основных фондов водопроводно-канализационного хозяйства;
- растущие требования к качеству потребляемой воды.

По состоянию на март 2011 г. около 37% поверхностных источников централизованного питьевого водоснабжения не соответствовало санитарным нормам и правилам (Роспотребнадзор). По итогам 2011 г. 8,4% населения РФ было обеспечено недоброкачественной питьевой водой (Единая межведомственная информационно-статистическая система, 2011).

Износ основных фондов водопроводно-канализационного хозяйства колеблется в промежутке от 50 до 70% (Роспотребнадзор, 2011). В результате вода повторно загрязняется, вследствие чего возникает потребность в ее повторном хлорировании, что приводит к переизбытку хлора в воде и опасности для жизни и здоровья людей.

В ходе разработки дорожной карты были выделены различные технологии водоочистки, позволяющие решить сложившиеся проблемы на каждой стадии водоочистки.

1. *Фильтрация механическая грубой очистки* необходима для удаления из воды крупных механических частиц, песка, взвесей, ржавчины, а также коллоидных веществ. В качестве очистителей используются сетчатые или дисковые фильтры грубой очистки, которые присоединяются непосредственно к водопроводу. К преимуществам данного способа очистки можно отнести отсутствие попадания каких-либо реагентов в воду, невысокую стоимость фильтрующих устройств. Ключевым недостатком такого метода является невозможность фильтрации мелких частиц (меньше 400–500 микрон).

2. *Коагуляция* – слипание твердых (коллоидных) частиц в дисперсных (связнодисперсных) системах при их соприкосновении. С точки зрения очистки воды к коагулянтам относят химические вещества, реагенты, способствующие слипанию коллоидных частиц и их удалению в дальнейшем. Химическими веществами, применяемыми в процессе коагуляции, зачастую являются соли алюминия и железа. Помимо этого, в последнее время появляются новые типы неоргани-

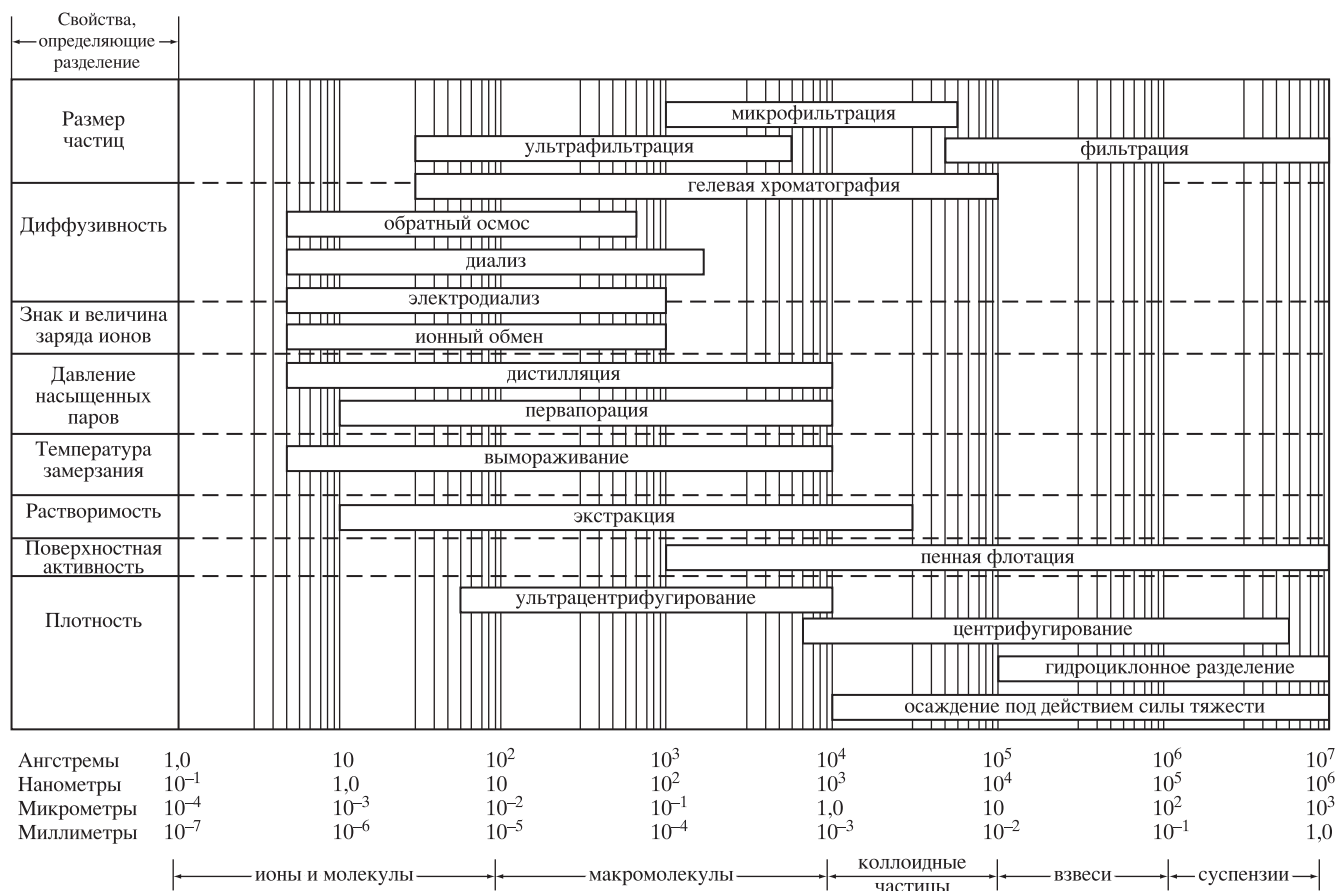


Рис. 2. Области применения процессов разделения

Источник: Membrane Engineering Systems, 2013.

ческих коагулянтов, на основе гидроксохлорида алюминия, “Аква-Аурата” и др., а также новые виды полимерных коагулянтов. Данные виды коагулянтов способствуют повышению качества и ускорению процесса водоочистки. Однако цены на них пока довольно высокие. Коагуляция в обязательном порядке применяется на всех станциях централизованного водоснабжения.

3. *Фильтрация тонкой очистки, или мембранные методы* (микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос), – очищение воды от различных примесей при помощи селективно-проницаемых перегородок – мембран. При этом размер пор мембран влияет на тип мембран и загрязнений, которые можно удалить с их помощью. Размер пор мембран может находиться в диапазоне от долей микрометров (в данном случае можно очистить от взвешенных частиц, бактерий, вирусов) до нескольких ангстрем (поры такого размера позволяют удалить из воды растворенные в ней вещества). По размеру пор классифицируются также виды применяемых мембран: микрофильтрационные, ультрафильтрационные, нанофильтрационные и обратноосмотические. При этом переход от одного типа мембран к другому разграничен в основном нечетко. Микро- и ультрафильтрационные мембраны дают возможность очистить воду от взвешенных, коллоидных частиц и крупных органических молекул, не изменяя солевого состава воды; нанофильтрация и обратный осмос способствуют удалению растворенных веществ (молекул и ионов). На рис. 2 представлена типология мембран в зависимости от размера пор.

4. Очистка путем *обеззараживания / окисления* позволяет удалить из воды различные микроорганизмы. Обеззараживание в большинстве случаев проводится за счет хлорирования, озонирования и ультрафиолетового облучения.

Хлорирование является наиболее распространенным и простым методом обеззараживания воды. Однако существенным недостатком данного способа водоочистки является образование

Таблица 1. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков некоторых типов адсорбентов

Название	Преимущества	Недостатки
Активные угли	Возможность многократного использования; регенерация; низкая стоимость	Загрязнение окружающей среды
Диатомит	Стабильность к механическим и термическим воздействиям	Плохая тепло- и звукопроводность; тугоплавкость
Трепел	Повышение прочности; уменьшение вспучивания	Низкая пористость; невысокие ионообменные свойства
Вспененный графит	Обогащает воду йодом; удаляет вирусы и бактерии	На текущий момент недостаточно активно применяется в практике водоподготовки
Каталитический алюмосиликатный адсорбент (адсорбент АС)	Устойчивость к хлору; удаляет сероводород	Не выявлены
Каталитический алюмосиликатный сорбент	Температурная устойчивость; возможность увеличения уровня pH воды	Не выявлены

Источник: результаты опроса экспертов из РХТУ им. Д.И. Менделеева, проведенного НИУ ВШЭ в 2011 г.

химических соединений, не существующих в природе, поэтому потребление такой воды может оказаться опасным для здоровья.

Озонирование воды основано на применении газа озона – сильного окислителя. В процессе взаимодействия с загрязняющими химическими веществами и микроорганизмами из озона образуется кислород. Однако данный метод очистки воды не нашло широкого применения на практике вследствие его энергозатратности, необходимости использования довольно сложной аппаратуры и дороговизны самого озона.

При обработке воды ультрафиолетом в воду не попадают никакие дополнительные реагенты. Ультрафиолетовое излучение удаляет различные загрязнители органического происхождения (например, микробы), при этом состав воды остается неизменным. Данное обстоятельство является основным преимуществом ультрафиолетового метода очистки перед хлорированием и озонированием. Кроме того, к достоинствам этого метода стоит отнести его низкую стоимость и простоту технического обслуживания. Однако при всех достоинствах ультрафиолетового обеззараживания его недостатком является возможность последующего загрязнения воды при ее дальнейшей обработке (ЗАО НПК “Медиана-Фильтр”¹).

5. *Адсорбция* – процесс водоочистки, основанный на применении специальных веществ-адсорбентов, которые способны очищать воду от вредных веществ за счет их поглощения. Адсорбентами могут быть материалы как природного, так и искусственного происхождения. Отличительной особенностью адсорбентов является большой размер поверхности, на которой происходит адсорбция веществ. На текущем этапе технологического развития в процессе водоочистки в основном применяются углеродные (на базе активных углей) и неуглеродные (на минеральной и иной основе, например, диатомит, трепел) адсорбенты. Кроме того, в последнее время стали возникать адсорбенты нового поколения, среди которых также выделяют углеродные (вспененные адсорбенты, адсорбенты с включением частиц фуллерена) и неуглеродные (каталитические алюмосиликатные сорбенты, акаганеит и др.) адсорбенты. Анализ преимуществ и недостатков адсорбентов представлен в табл. 1.

Таким образом, различные технологии водоочистки обладают сравнительными преимуществами и недостатками в зависимости от стадий водоочистки.

Инструментарий таблиц событий может последовательно применяться для каждого этапа разработки дорожной карты в сфере водоочистки:

¹ См. материалы на сайте http://www.mediana-filter.ru/water_filter_uf.html.

- 1) общее исследование и анализ предметной области;
- 2) анализ и выбор технологий водоочистки и водоподготовки;
- 3) расчет и анализ стоимости оборудования;
- 4) анализ факторов, влияющих на выбор технологий.

При исследовании предметной области на основе экспертных данных были выделены следующие факторы, влияющие на выбор технологий:

- 1) показатели качества воды;
- 2) эффективность технологий водоочистки;
- 3) стоимость технологий водоочистки;
- 4) число водоисточников в регионе.

Рассмотрим подробнее каждый фактор.

1. *Показатели качества воды и их норма в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01 и ГН 2.1.5.68998 с доп. № 1, 2, 3, разделенные на следующие секции:*

- бактериологические;
- санитарно-химические – фекального загрязнения;
- санитарно-гигиенические;
- санитарно-органолептические;
- санитарно-химические, влияющие на органолептическое состояние;
- санитарно-химические – загрязнения бытовой химией и нефтепродуктами;
- санитарно-токсикологические.

2. *Эффективность технологий водоочистки* для приведения к норме каждого показателя качества воды. Как было показано выше, были выделены следующие основные группы технологий водоочистки:

- фильтрация – механическая грубая очистка;
- коагуляция / регенерация;
- фильтрация – тонкая очистка (мембранные методы водоочистки);
- окисление / обеззараживание;
- адсорбция.

Указанный перечень может быть расширен и дополнен в зависимости от целей и глубины очистки воды.

В ходе разработки дорожной карты получены сводные данные по показателям качества воды и эффективности технологий водоочистки. Индикаторы подразделяются на семь секций, в рамках каждой секции выделяются три показателя, характеризующие качество воды. Для каждого такого показателя сделана экспертная оценка эффективности очистки воды при помощи различных технологий. При этом под эффективностью очистки понимается процент снижения различных типов загрязнений воды по сравнению с их исходным уровнем. Пример полученных данных для секций “Бактериологические показатели” и “Санитарно-химические показатели фекального загрязнения” представлен в табл. 2.

Стоит отметить, что в нашей модели предусмотрена возможность возникновения кумулятивного перекрестного эффекта при применении нескольких технологий водоочистки одновременно или последовательно. В формализованном виде наличие данного эффекта выглядит следующим образом:

$$R = YE_1 \dots E_n,$$

Таблица 2. Качество воды и эффективность технологий водоочистки

Секция	Показатель	СанПиН 2.1.4.1074-01 (ранее 2.1.4.55996) и ГН 2.1.5.68998 с доп. № 1–3	Эффективность технологий очистки воды, %				
			Фильтра- ция меха- ническая грубой очистки	Коагуля- ция/ реге- нерация	Фильтра- ция тонкой очистки	Фильтры окисли- тельные/ обеззара- живающие	Адсорб- ция
Бактерио- логиче- ские по- казатели	Общие коли- формные бакте- рии, число бак- терий в 100 мл	Отсутствие	10	10	80	40	30
	Общее микроб- ное число, число образующих ко- лоний бактерий в 1 мл (подсчет колоний при 22°C)	≤50,0	10	10	80	40	30
	Колифаги, чис- ло бляшкообра- зующих единиц (БОЕ) в 100 мл	Отсутствие	0	30	75	40	30
Санитар- но-хими- ческие по- каза- тели фе- кального за- грязне- ния	Хлориды (Cl-), мг/л	350,0	20	10	75	–20	30
	Аммиак (по N), мг/л	2,0	25	20	80	0	0
	Нитраты (по N032-), мг/л	45,0	20	30	70	0	30

Источник: СанПиН 2.1.4.1074-01 и экспертная оценка авторов.

где Y – начальный показатель параметра (например, общее микробное число); $E_1 \dots E_n$ – эффективности технологий (%); n – число технологий; R – результативный показатель параметра после применения технологий очистки.

При применении коагулянтов и дезинфектантов в процессе водоподготовки будут возникать новые химические соединения, по концентрации превосходящие допустимые нормативными документами величины (см. табл. 2). В данном случае в нашей модели предусмотрено применение фильтров тонкой очистки и адсорбции. Образовавшиеся в результате водоочистки химические соединения могут быть удалены вместе с осадком перед поступлением к потребителю. При этом в результате биохимических и химических реакций возникают новые компоненты, более сложные в молекулярном отношении (иногда с высоким токсическим эффектом), концентрацию которых на выходе обязательно необходимо снизить после применения выбранной технологии очистки.

В данном контексте наиболее дорогостоящим механизмом являются фильтры тонкой очистки, так как в них используются современные мембранные технологии с применением химических элементов редкоземельных металлов. Частота замены таких фильтров может варьировать в зависимости от производительности применяемого картриджа водоочистки. В среднем в многоквартирных домах их замена должна осуществляться раз в квартал. Большинство современных фильтров производится на экспериментальных предприятиях небольшими партиями на заказ, что не позволяет массово производить типовые элементы и регулярно поставлять их конечному потребителю.

Таблица 3. Расчет стоимости оборудования, применяемого для различных технологий водоочистки

Технология водоочистки	Фильтрация механическая	Коагуляция / регенерация	Фильтрация тонкой очистки	Фильтры окислительные / обеззараживающие	Адсорбция
Стоимость оборудования, долл. США	18 026	164 509	563 879	222 144	430 976

Источник: исследование НИУ ВШЭ.

Примечание. Стоимость рассчитана на основе розничных цен на оборудование; цены приведены по состоянию на 2012 г. на основе анализа открытых источников информации.

В зависимости от набора примененных технологий стоимость очистки может варьировать. Расчет общей стоимости водоочистки должен проводиться в каждом индивидуальном случае и всегда будет связан с изначальным качеством воды, которую используют для питьевых целей. Данная стоимость будет зависеть от того, какую воду необходимо подать на выходе: для хозяйственно-бытовых или питьевых целей.

На практике используются наиболее эффективные для грубой очистки методики с последующей фильтрацией и обеззараживанием. Потребителю необходимо самостоятельно устанавливать дополнительные станции очистки подаваемой воды на производствах, в бытовых условиях, а также внутриквартальные станции водоочистки. Однако данный вариант в процессе оптимизации не рассматривался в связи с недостатком количественных данных (информации о стоимости оборудования для такого случая в открытом доступе). При наличии соответствующей информации в дальнейшем для такого варианта также может быть рассчитана стоимость оборудования.

3. *Стоимость оборудования*, применяемого для различных технологий водоочистки (табл. 3).

4. *Число водоемисточников в регионе*. Информация об этом анализируется отдельно для каждой конкретной территории.

На основе полученных факторов, влияющих на выбор технологий, и анализа предметной области разработана система таблиц событий, представленная на рис. 3. Она включает комплекс событий – исходную информацию, промежуточные итоги, развилки, а также генерацию выводов. В результате применения всех процедур обработки информации могут быть получены выводы, дающие основания для выбора наилучшего способа очистки воды.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: TE1 – анализ стоимости оборудования, применяемого для технологий водоочистки и водоподготовки в выбранном регионе; условия таблицы событий TE1: TE1.e1 – регион выбран; TE1.e2 – получен анализ спроса по региону. Действия таблицы событий TE1: TE1.A1 – получить список водозаборов; TE1.A2 – выбрать первый по списку водозабор; TE1.A3 – провести анализ и вычисление спроса; TE1.A4 – обработать таблицу TE1 заново; TE1.A5 – рассчитать стоимость оборудования в регионе; TE1.A6 – завершить анализ стоимости оборудования в регионе (сообщение “Анализ завершен или регион не выбран”). TE2, TE3 и т.д. по аналогии обозначают конкретные события в системе в соответствии с этапами разработки дорожной карты.

С математической точки зрения функция “Подбор технологий очистки воды” представляет собой решение задачи поиска минимума и описывается следующей системой:

$$\begin{cases} \forall m, m = 1, \dots, M, \\ k = 1, \dots, K, \\ Y_m = y_m(1 - z_{1m}x_1)(1 - z_{2m}x_2) \dots (1 - z_{km}x_k), \\ x_k \in \{0, 1\}, \\ Y_m \leq N_m, \\ 0 \leq z_{km} \leq 1, \\ F(x) = x_1s_1 + x_2s_2 + \dots + x_ks_k \rightarrow \min, \end{cases}$$

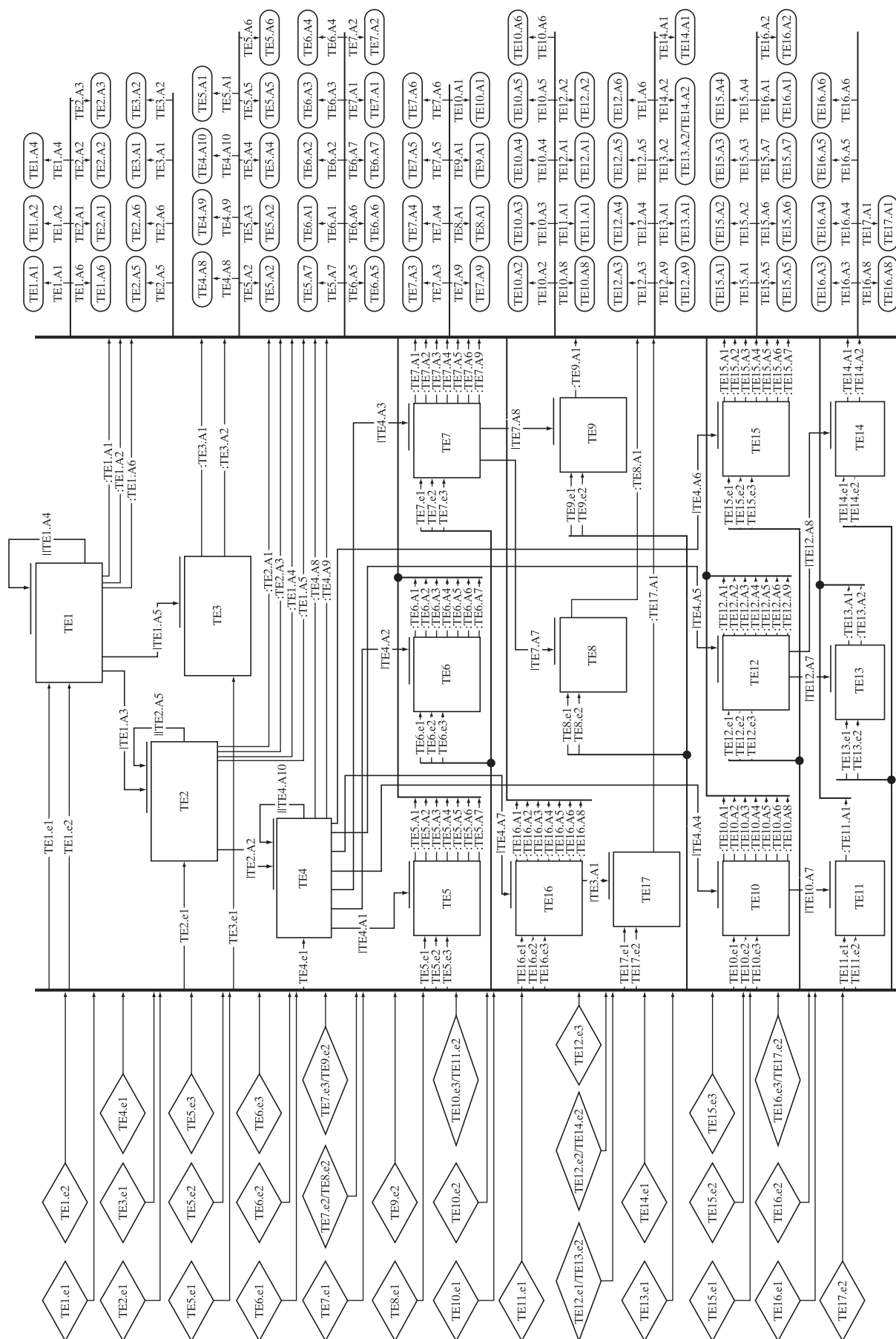


Рис. 3. Система таблиц событий

где M – число параметров качества воды; K – число технологий водоочистки; y_m – значение параметра качества воды до очистки; Y_m – значение параметра качества воды после очистки; N_m – значение нормы параметра качества воды; x_k – применение технологии (1 – расчет будет производиться с учетом того, что технология применяется, 0 – в противном случае); z_{km} – эффективность применения технологии k для очистки параметра качества воды m ; s_k – стоимость оборудования, применяемого для технологии водоочистки.

Для формулирования стратегий продвижения технологий очистки воды выявлены однородные группы регионов, для которых характерны одинаковые типы проблем, связанные с качеством питьевой воды. В соответствии со степенью распространения централизованного водоснабжения регионы были разбиты на две группы. В первой группе (с большей долей общей площади региона, оборудованной водопроводом) были выделены четыре подгруппы в зависимости от качества воды в водоисточниках и качества воды, доставляемой потребителю по сетям.

Для каждой подгруппы регионов были сформированы стратегии водоочистки, представляющие собой рекомендации для применения различных технологий очистки воды.

В частности, к подгруппе наименее благополучных регионов с высокой степенью распространения централизованного водоснабжения были отнесены Кировская и Ростовская области, Карачаево-Черкесская Республика и еще семь субъектов РФ. Для данной подгруппы регионов характерно низкое качество воды как в источниках централизованного водоснабжения, так и на выходе из разводящих сетей. Половина регионов из данной группы характеризуется относительно низким уровнем экономического развития, в связи с чем необходимо активное участие федерального центра в решении проблем водоочистки и водоподготовки в данных регионах. Однако в регионах той же подгруппы, характеризующихся относительно более высоким уровнем социально-экономического развития (например, Тюменская область) наблюдается низкое качество источников децентрализованного водоснабжения, при том что доля источников децентрализованного водоснабжения, не отвечающих установленным нормам, также довольно высока. С учетом высокого уровня социально-экономического развития этих регионов здесь возможно продвижение мембранных технологий для индивидуальной и коллективной водоочистки.

Московская область, анализируемая далее в статье в качестве модельного примера, была отнесена к группе регионов с развитым централизованным водоснабжением, характеризующихся низким качеством воды в водоисточниках и относительно высоким качеством воды, доставляемой потребителю по сетям. Такая совокупность параметров свидетельствует об относительно благополучной ситуации в разводящих сетях и оборудовании на станциях центрального водоснабжения. Наилучшей стратегией для данной подгруппы регионов, наряду с модернизацией существующих технологий водоочистки, может стать внедрение мембранных биореакторов для очистки промышленных и муниципальных стоков, что в дальнейшем позитивно скажется на качестве воды в водоисточниках.

В группе регионов с меньшей степенью распространения централизованного водоснабжения также было выделено четыре подгруппы регионов в зависимости от сочетания двух факторов – качества водоисточников децентрализованного водоснабжения и качества централизованного водоснабжения.

Наименее благополучной ситуация была признана в девяти регионах, среди которых Псковская и Вологодская области, Республика Калмыкия и др. Регионы данной группы характеризуются как низким качеством источников децентрализованного водоснабжения, так и проблемами в сфере централизованного водоснабжения. Здесь возможны две стратегии модернизации: расширение централизованного водоснабжения либо более активное продвижение новых технологий для индивидуального и коллективного водопользования.

Таким образом, всего было выделено восемь групп регионов, для которых предложены различные стратегии продвижения технологий водоочистки. В соответствии с рекомендуемой стратегией для каждой группы регионов может быть выбран доступный набор технологий, из которого методом таблиц событий подбирается наиболее оптимальная группа технологий водоочистки. На этой основе представляется возможным оценить стоимость оборудования, применяемого для различных технологий водоочистки.

Таблица 4. Примеры параметров качества воды

Параметр	Классы качества воды		
	3	2	1
Общие колиформные бактерии, число бактерий в 100 мл	1000	500	200
Общее микробное число, число образующих колоний бактерий в 1 мл (подсчет числа колоний при 22 °С)	1000	500	200
Колифаги, число бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл	500	250	100
...	...	...	...

Источник: исследование НИУ ВШЭ.

С математической точки зрения функция “Расчет стоимости оборудования в регионе” представляет собой решение описанной ниже задачи:

$$\begin{cases} \forall l, l = 1, \dots, L, \\ k = 1, \dots, K, \\ r_l = v_l(x_{1l}s_1 + x_{2l}s_2 + \dots + x_{kl}s_k), \\ x_{kl} \in \{0, 1\}, \\ R = \sum_{l=1}^L r_l, \end{cases}$$

где L – число классов водоисточников; K – число технологий водоочистки; x_{kl} – применение технологии k для источников класса l (1 – расчет будет производиться с учетом того, что технология применяется, 0 – в противном случае); v_l – число источников класса l ; r_l – общая стоимость применения выбранных технологий для всех водозаборов с учетом класса водоисточника l ; R – общая стоимость оборудования в регионе.

Как отмечалось выше, в качестве примера региона, используемого для моделирования, была выбрана Московская область. При моделировании разработанной системы таблиц событий в качестве входных данных использовалась следующая информация о регионе:

– стоимость оборудования (табл. 3), сформированная на основе усреднения цен на элементы водоочистки и водоподготовки, которые можно приобрести на территории России;

– значения параметров качества воды для водоисточников трех классов, полученных на основе экспертных данных. Пример трех параметров представлен в табл. 4. Всего в процессе моделирования были использованы данные по 21 параметру качества воды. В частности, все существующие водоисточники были разделены на три класса с различными требованиями к качеству воды (для класса 1 требования – наиболее жесткие, для класса 3 – наименее жесткие);

– данные о числе водоисточников в Московской области (табл. 5).

В результате моделирования были получены следующие результаты и выводы.

1. Подобрана комбинация технологий, которые являются оптимальными для приведения к норме воды из источников класса 2 и класса 3: 1) фильтрация механическая – для грубой очистки; 2) коагуляция / регенерация; 3) фильтрация тонкой очистки; 4) фильтры окислительные / обеззараживающие; 5) адсорбция.

Выбор технологий производился на основе их соответствия двум критериям: оптимального соотношения цены и качества. Предложенный инструментальный таблиц событий позволяет моделировать различные комбинации технологий очистки воды (с указанием их стоимости) и качества воды,

Таблица 5. Число водоисточников различных классов в Московской области (всего 15 563 водоисточника)

Класс водоисточника	Число
Первый (1)	2802
Второй (2)	11 207
Третий (3)	1554

Источник: исследование НИУ ВШЭ.

получаемой на выходе. Таким образом, для каждого региона в зависимости от требований к качеству очищенной воды может быть подобрана оптимальная комбинация технологий водоочистки.

2. Набор технологий, которые являются оптимальными для приведения к норме воды из источников класса 1: 1) фильтрация механическая – для грубой очистки; 2) фильтрация тонкой очистки; 3) фильтры окислительные / обеззараживающие; 4) адсорбция.

Представленный выше список технологий может быть расширен и дополнен на начальном этапе анализа. В зависимости от того, какие технологии будут выбраны изначально, изменится и выбор оптимальных технологий для очистки.

3. Применение метода таблиц событий дает возможность получать оценки стоимости оборудования, применяемого для различных технологий водоочистки в регионе. В данном примере был рассчитана стоимость оборудования для водоочистки в Московской области (без учета уже функционирующих на водозаборах технологий). Она составила 21,3 млрд долл.

Аналогичным образом может быть оценена стоимость оборудования в других регионах.

В дальнейшем в модель может быть интегрирована информация о возможностях закупки данного оборудования предприятиями в регионе. Такую информацию можно получить после опроса предприятий. В итоге дополнительных исследований может быть оценен платежеспособный спрос на технологии водоочистки в регионе.

Полученные в ходе исследования результаты обладают следующими элементами научной новизны: предложен новый метод систематизации исходной информации с учетом возможности дальнейшего моделирования и экономической оценки полученных результатов на примере формирования дорожной карты очистки воды.

В результате анализа открытых источников не было обнаружено исследований в сфере применения математического моделирования для подбора комбинации технологий водоочистки с целью экономической оценки их стоимости для формирования дорожной карты. Проведенные исследования посвящены математическому моделированию самого процесса очистки воды (Математическое моделирование, 2010), а не оценке стоимости данного процесса в различных регионах с помощью дорожных карт. Таким образом, не представляется возможным провести параллель с другими исследованиями.

Однако проанализированный в статье инструментарий таблиц событий имеет широкие возможности практического применения в сфере дорожного картирования. Исследование НИУ ВШЭ показало, что метод таблиц событий может активно применяться для обработки информации, необходимой для построения дорожных карт. Этот метод может быть эффективно использован в сочетании с экспертными процедурами и верификацией полученных выводов. Применение описанного подхода может способствовать выработке обоснованных стратегий инновационного развития различных предметных областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов О.В., Еремеев А.П.** (2009). Современные программные средства поддержки принятия решений на основе аппарата таблиц событий. В кн.: *“Интеллектуальные системы”*. Колл. монография. Вып. 3. М.: Физматлит. С. 140 – 155.
- Вишневский К.О., Карасев О.И.** (2010). Прогнозирование развития новых материалов с использованием методов Форсайта // *Форсайт*. № 2. С. 58–67.
- Единая межведомственная информационно-статистическая система (2011). [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.fedstat.ru/indicator/data.do>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: март 2015 г.).
- Кулешова О.Н.** (2012). Разработка методов спецификации информационных моделей средствами языка таблиц событий // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 4/2(58). С. 28–31.

- Кулешова О.Н., Апраксин Ю.К.** (2011). Спецификация распределенных систем на основе таблиц событий. В сб. науч. трудов: *“Оптимизация производственных процессов”*. Вып. 13. Севастополь. С. 52–57.
- Математическое моделирование процессов очистки сточных вод (2010). Сборник докладов межотраслевой конференции “Вода в промышленности–2010”, г. Москва, ГК “Измайлово”. М.: ЗАО “Водоснабжение и водоотведение”.
- ОАО “РОСНАНО” (2013). [Электронный ресурс] Официальный сайт группы ОАО “РОСНАНО”. Режим доступа: <http://www.rusnano.com/investment/roadmap/clearwater>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: март 2015 г.).
- Роспотребнадзор (2011). [Электронный ресурс] Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Режим доступа: <http://rospotrebnadzor.ru>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: март 2015 г.).
- Сметанин Ю.М.** (2009). Таблица решений как частный случай продукционных систем и их применение для фиксации принципа действия и ООД при обучении экономистов // *Вестник Удмуртского университета. Серия: экономика и право*. Сб. науч. трудов. Вып. 1. С. 85–96.
- Соколов А.В.** (2007). Форсайт: взгляд в будущее // *Форсайт*. № 1. С. 8–15.
- CODASYL (1982). A Modem Appraisal of Decision Tables. Report of the Decision Table Task Group. N.Y.: ACM.
- CSA Z243.1-1970 (1970). Standard. Decisiontables. Canadian Standard Association. Canada.
- DIN 66241 (1979). Entscheidungstabellenlechnik fur den Informationsaustausch Berlin: Beuth Verlag.
- King J.E.** (1959). LOGTAR: a Logic Table Technique. Fairfield. General Electric.
- Membrane Engineering Systems (2013). [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://me-system.ru/o-nas/poleznaya-informatsiya/oblasti-primeneniya-protseessov-razdel/>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: март 2015 г.).
- Phaal R., Farrukh C., Probert D.** (2001). Technology Roadmapping: Linking Technology Resources to Business Objectives. [Электронный ресурс] Cambridge. Centre for Technology Management. University of Cambridge. P. 3–4. Режим доступа: <http://www-mmd.eng.cam.ac.uk/ctm/>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: март 2015 г.).
- Popper R.** (2008). Foresight Methodology. In: *“The Handbook of Technology Foresight”* Georgiou L., Cassingena J., Keenan M., Miles I., Popper R. (eds.). Cheltenham: Edward Elgar. P. 44–88.

Поступила в редакцию
13.08.2013 г.

Event Tables for the Roadmap Development in the Water Purification Industry

O.N. Kuleshova, N.N. Veselitskaya, O.I. Karasev, A.V. Bogomolova

The authors propose an integrated approach to the roadmap development that implies the combined use of qualitative and quantitative methods. In particular, the analysis of the event tables' application to the roadmap creation in the water purification industry. The authors approach can contribute to the development of innovation-based strategies in different subject areas.

Keywords: roadmap, event tables, water purification industry.

JEL Classification: C61, L6.