

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ № 4 2015
СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

УДК 621.372.413

*В. Ф. КРАВЧЕНКО¹, Е. В. КРИВЕНКО², С. А. ЛЕВЧЕНКО³,
В. И. ЛУЦЕНКО², С. В. ПЛЮТА³*

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ СМАРТ-ГРИД ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
И МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

¹*Институт радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия,
e-mail: kvf-ok@mail.ru,*

²*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина,
e-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua,*

³*Институт тепло и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: lev@hmti.ac.by*

Данная статья посвящена применению современных интеллектуальных технологий для модернизации и развития систем водоснабжения. Разработана математическая модель анализа и управления такими сетями, основанная на математике нечетких множеств и технологий смарт-грид. Описаны макет датчиков и методы измерений датчиками качества воды.

Ключевые слова: технологии смарт-грид, нечеткая логика, облачные вычисления, нестационарное уравнение диффузии.

*V. F. KRAVCHENKO¹, O. V. KRIVENKO², S. A. LEVCHENKO³,
V. I. LUTSENKO², S. V. PLUYTA³*

**SMART GRID TECHNOLOGIES APPLICATION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT
AND MODERNISATION OF WATER SUPPLY SYSTEMS**

¹*Institute of radiotechnics and electronics RAS, Moscow, Russia, e-mail: kvf-ok@mail.ru,*

²*O. Ya. Usikov Institute for radiophysics and electronics NAS Ukraine, Kharkov, Ukraine,
e-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua,*

³*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: lev@hmti.ac.by*

This article is devoted to application of modern intellectual technologies for modernization and development of water supply systems. A mathematical model of the analysis and management of such networks based on fuzzy mathematics and smart grid technologies is developed. The layout of sensors and methods of measurements by sensors of quality of water are described.

Keywords: smart grid technology, fuzzy logic, cloud computing, non-stationary diffusion equation.

Введение. Одной из ключевых проблем 21 в. является обеспечение человечества необходимым количеством и качеством воды. Плохое качество воды вредит здоровью человека и сказывается на эксплуатации экосистем. Экономический ущерб от некачественной воды в странах Ближнего Востока и Северной Африки составляет от 0,5 до 2,5% ВВП. Стратегия сотрудничества и профилактики, которую называют Планом безопасности водных ресурсов, продемонстрировала экономию средств и повышение качества воды.

В этой связи значительный интерес представляют новые технологии, основанные на методологии интеллектуальных сетей (smart grid), которые смогут взять на себя функции мониторинга здоровья пользователей, управления качеством воды, а также транспортной и энергетической

инфраструктурой городов [1]. Их разработка напрямую связана с созданием интеллектуальных датчиков контроля качества поступающей к потребителю воды, сочетающих низкую стоимость и простоту эксплуатации; надежность получаемой потребителем информации, от которой зависит его безопасность; возможность непрерывного контроля в реальном времени качества поступающей потребителю воды; возможность подачи воды потребителю с заданным качеством и стоимостью [2, 5].

В перспективе применение технологий смарт-грид для управления водными ресурсами позволят оптимизировать обеспечение потребителей водой заданного качества при минимизации расходов на ее подготовку и утилизацию. Ключевым звеном для создания таких технологий является разработка сенсоров контроля качества воды, обеспечивающих непрерывный контроль в реальном времени и обладающих достаточно низкой стоимостью, а также общих принципов построения систем водоснабжения смарт-грид.

Необходимость использования технологий смарт-грид при обеспечении водой населения и объектов промышленности обусловлена минимизацией расходов на подготовку и транспорт воды необходимого качества к потребителю. Основная идея состоит в использовании общей инфраструктуры для транспорта как технической, так и питьевой воды при временном разделении этих потоков и обеспечении требуемого качества воды для каждого индивидуального потребителя. Использование для транспортировки как технической, так и питьевой воды общей инфраструктуры позволяет снизить затраты на обеспечение потребителя водой. Предлагаемая концепция водоснабжения смарт-грид вписывается в активно реализуемую в настоящее время концепцию «умного дома».

Управление системами водоснабжения с помощью математики нечетких множеств

Математическая модель. В системах управления интеллектуальным водоснабжением жилых зданий или городских кварталов, особенно в случаях неполноты данных, предлагается применение систем, основанных на математике нечетких множеств (fuzzy sets) и нечеткой логике (fuzzy logics). В ситуациях, когда некоторые параметры функционирования системы неизвестны с достаточной точностью и необходимо применять нечеткие знания или экспертные оценки, подобный подход успешно решает задачи управления с высокой степенью надежности. Задача обеспечения потребителей достаточным количеством воды различной степени очистки является многокритериальной задачей [6–17] с неизвестными параметрами, которые могут быть представлены нечеткими числами. Даже сама цель управления – «обеспечение достаточным количеством» имеет ярко выраженную нечеткость в самой постановке [18–21]. С одной стороны, необходимо обеспечить надежность водоснабжения, а с другой стороны, обеспечить эффективность и минимум затрат реализации решения.

Для этого случая задача многокритериального анализа определена как процесс нахождения минимума нечеткого отклика \tilde{Z} от вектора \tilde{X} решения на наборах нечетких функций :

$$\tilde{Z}(\tilde{X}) = \{ \tilde{f}_1(\tilde{x}), \tilde{f}_2(\tilde{x}), \dots, \tilde{f}_n(\tilde{x}) \}, \quad (1)$$

где $\tilde{f}_j(\tilde{x})$ – целевые нечеткие функции, определенные на векторах \tilde{X} нечетких критериев.

Для нахождения решения используются модифицированные для математики нечетких чисел градиентные и не градиентные методы поиска оптимума регрессионных моделей [16,17].

В нашем случае используется метод нахождения нулей градиента функции отклика $Y(X)$, вблизи точки $X^0(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0)$:

$$\text{grad}(Y(X)) = \left(\left. \frac{\partial Y}{\partial X_1} \Big|_{X_0}, \frac{\partial Y}{\partial X_2} \Big|_{X_0}, \dots, \frac{\partial Y}{\partial X_n} \Big|_{X_0} \right) \}. \quad (2)$$

Если функцию отклика $Y(X)$ разложить в ряд Тейлора в окрестностях точки X_0 , то, ограничиваясь лишь линейными членами, приближенно получаем

$$\begin{aligned}
Y(X) &\cong Y(X_0) + \frac{\partial Y}{\partial X_1} \Big|_{X_0} (X_1 - X_1^0) + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} \Big|_{X_0} (X_n - X_n^0) = \\
&= \bar{B}_0 - B_1(X_1 - X_1^0) + B_2(X_2 - X_2^0) - \dots + B_n(X_n - X_n^0).
\end{aligned}
\tag{3}$$

Можно заметить, что формула (3) совпадает с формулой линейной полиномиальной модели с коэффициентами B_1, B_2, \dots, B_n , или, переходя к нечетким функциям, задача сводится к нахождению решения нечеткого полинома [22] вида

$$\tilde{B}_0 - \tilde{B}_1(\tilde{X}_1 - X_1^0) + \tilde{B}_2(\tilde{X}_2 - X_2^0) - \dots + \tilde{B}_n(\tilde{X}_n - X_n^0).
\tag{4}$$

Получающийся в результате нахождения минимума вектор нечеткого отклика \tilde{Z} и является оптимизированным решением модели водоснабжения.

Поиск решения в условиях неполноты исходных данных. В системах «умного водоснабжения» часто возникают ситуации, когда необходимо проводить вычисления в условиях недостатка данных. Например, при расчетах моделей интеллектуальных сетей очистки, распределения и потребления воды (smart water grid), когда необходимо принимать в расчет множественные динамические параметры функционирования устройств сети, не все данные могут быть получены или рассчитаны из текущих условий. В этих ситуациях часто используют экспертные оценки или даже тренды, рассчитанные из предыдущих значений, т.е. данные на основе предсказания путем расчета предыдущих состояний модели. Это, однако, требует проведения большого объема вычислений, что не всегда возможно в реальной ситуации, особенно в системах реального времени. В этих условиях оказывается возможным проводить расчеты, используя методы нечеткой математики (fuzzy mathematics), которые позволяют достичь результатов с хорошим приближением и без громоздких расчетов [22–24].

В системах smart-водоснабжения ситуация с недостатком данных возникает с высокой вероятностью, поэтому применение методов расчетов с использованием математики нечетных множеств весьма оправдано. Нами разработана система веб-сервисов, которые в совокупности позволяют решить задачу оптимизации моделей потребления воды в реальном времени.

Рассмотрим конкретно сервисы, которые производят расчеты моделей водоснабжения, в том числе и в условиях недостатка данных:

- сервис моделей водоснабжения WMS (water modeling service);
- сервис прогнозирования потребления воды WFS (water forecast service);
- сервис оптимизации стоимости воды WCO (water cost optimization);
- сервис оптимизации режимов потребления воды WRO (water regimes optimization);
- сервис для реализации оптимизированной политики расчета цены очистки и доставки воды в зависимости от актуальных потребностей потребителей WPO (water politics optimization);
- сервис анализа эффективности водоснабжения в реальном масштабе времени WAS (water analysis supply);
- сервис информационного хранилища DBS (data base storage);
- сервис анализа эффективности водоснабжения в реальном масштабе времени WAS (water analyses service).

Сервис моделей водоснабжения WMS предназначен для хранения и управления моделями. Его основными задачами являются обеспечение загрузки актуальных параметров модели по запросу других сервисов, подготовка данных и их сохранение в модуле управления базами данных (DBS) после завершения запросов.

Основное предназначение сервиса прогнозирования потребления воды WFS – вычисление трендов потребления воды на различных уровнях и получение предсказания потребления на ближайший период. Для этого сервис использует открытые в интернете служебные сервисы, в частности, сервисы предсказания погоды для вычисления температурных параметров в прогнозируемый момент, данные потребления и производства воды за предыдущие периоды и расчеты, полученные от блока моделирования. При этом также не все данные могут быть доступны в момент вычислений, поэтому частично используется математика нечетких множеств.

Задача сервиса оптимизации режимов потребления воды WRO – вычисление оптимизированных условий функционирования участков смарт-водоснабжения, приводящих к уменьшению общего потребления воды. Конечно, данный сервис находится в противоречивых условиях, поскольку нельзя уменьшать потребление воды потребителями в квартирах или домах, так как это может снизить уровень их комфорта. Сервис может лишь предлагать сценарии использования домашнего оборудования с целью общего снижения потребления.

Задача оптимизации стоимости воды WCO – решение платежей владельцев домов за использованную воду. Это, на первый взгляд, очень похоже на задачу, решаемую сервисом WRO. Хотя этот сервис также предлагает владельцам домов изменять планы использования домашнего оборудования, но целевая функция у него совершенно другая. Это значит, что рекомендации по изменению графиков использования оборудования будут совершенно различными.

Сервис для реализации оптимизированной политики расчета цены очистки и доставки воды в зависимости от актуальных потребностей потребителей WPO предназначен решать вопросы оптимизации ценообразования, так сказать, с точки зрения поставщика услуг водоснабжения.

Сервис информационного хранилища DBS выполняет задачи непосредственного управления системами хранения информации.

Сервис анализа эффективности водоснабжения в реальном масштабе времени WAS необходим для решения специальных задач работы моделей водоснабжения в специфических реальных условиях.

Поскольку ясно, что для эффективной работы сервисов часто не хватает данных, то необходимы методы, с помощью которых можно получать решения с достаточной точностью в данных условиях.

Для этого в систему включен специальный блок в виде статической библиотеки, написанной на языке программирования C++, которая использует fuzzy mathematics для вычисления недостающих данных и принятия решения в этих условиях. Этот блок используется во внутренних вызовах сервисов WFS, WCO WRO и WPO в случае недостатка данных для расчета необходимых параметров и обеспечения задач поддержки принятия решения.

Алгоритм работы сервисов с учетом вызовов методов библиотеки нечетких множеств показан на рис. 1.

Владелец дома выбирает план использования устройств водоснабжения. Этот план пока является предварительным и отражает лишь предпочтения пользователя. Последовательные вызовы методов сервисов управления должны оптимизировать план с учетом всех внутренних условий и текущих значений потребления энергии и ценовой политики генерирующих и распределяющих энергию организаций. Вызов сервиса WCO и последовательная работа его методов обеспечивают оптимизацию плана с целевой функцией снижения платежей за использованную воду.

Далее необходимо оптимизировать план для снижения уровня расхода воды. Это можно сделать путем более эффективного использования

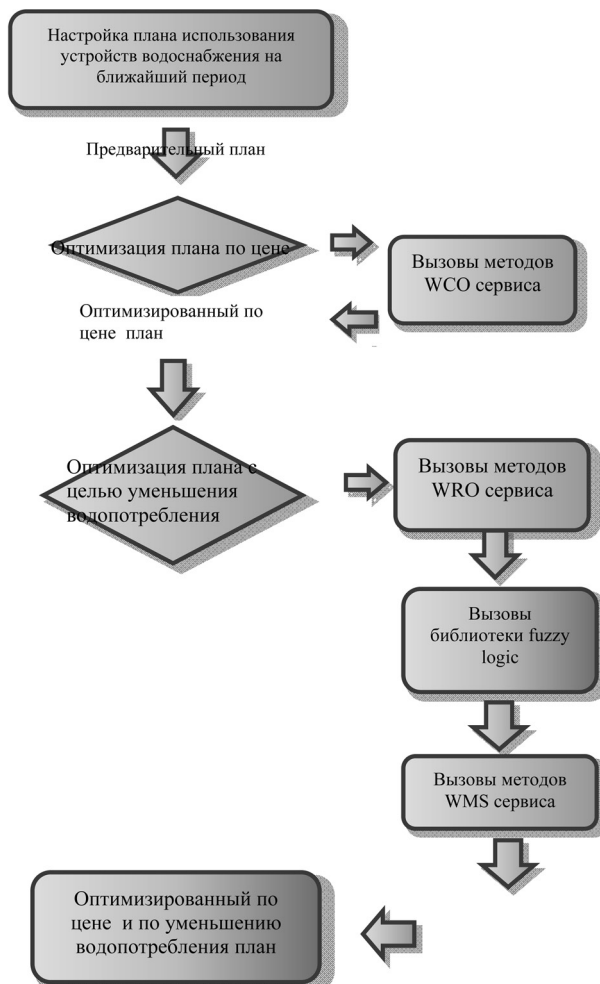


Рис. 1. Алгоритм оптимизации плана водоснабжения с целью уменьшения стоимости и уровня потребления воды

трубопроводной системы и систем внутреннего распределения воды, т. е. выравниванием как пиковых значений потребления, так и общих, суммарных значений.

В случае недостатка данных для принятия решения по оптимизации плана использования устройств водоснабжения система запускает цепочку расчетов через вызовы библиотеки fuzzy logic со встроенной системой принятия решений (рис. 2).

Таким образом, и в случае неполноты исходных данных для построения модели, находится оптимизированное решение распределения ресурсов для смарт-сетей водоснабжения.

Необходимость использования технологий смарт-грид для минимизации затрат на обеспечение потребителей водой. Для подачи воды потребителю используется единая система водоснабжения. Дополнительные системы водоснабжения технической водой в ряде случаев применяются для потребителей с большими объемами ее использования, при компактном их расположении, например, в горно-металлургических процессах: до 10 м³ воды /т руды или угля, в обогащательном переделе 20–50 м³/т получаемого чугуна, 150 м³ воды /т стали. Такая вода по содержанию примесей (твердых взвесей, эмульсий и растворенных веществ) пригодна для использования в технологических процессах, но непригодна для питья. Она получается, как правило, в результате неполной очистки промышленных и бытовых стоков, из соленых морских или других природных и шахтных вод, из систем водооборота на обогащательных, металлургических и других производствах. Например, только в Украине и России при добыче угля и сланцев из шахт и разрезов ежегодно откачивают 2 млрд м³ подземных вод. Основные трудности использования технической воды связаны с необходимостью прокладки и эксплуатации двух параллельных водопроводных систем: для бытовой и технической воды. При этом водопровод для технической воды требует значительно более частого ремонта из-за забивания труб осадками, твердыми взвесями и т. п. (замена труб, насосов и других устройств).

В большинстве случаев для потребителей используется единая система водоснабжения. При этом качество воды для нее доводится до уровня питьевой. Пусть удельные расходы на подготовку питьевой воды на центральной станции C_0 , технической воды C_{-1} . Если объем потребляемой питьевой воды составляет $V_0 = \alpha_0 V$, а технической воды – $V_{-1} = \alpha_{-1} V = (1 - \alpha_0) V$, то минимальные затраты на обеспечения потребителей водой составят

$$Z_{\min} = (C_0 \alpha_0 + C_{-1} (1 - \alpha_0)) V \quad (5)$$

при поставке потребителям необходимого количества питьевой и технической воды.

В большинстве случаев потребителям доставляется питьевая вода, которая ими расходуется не только по прямому назначению, но и для технических и бытовых нужд. Затраты при этом составляют

$$Z = C_0 V. \quad (6)$$

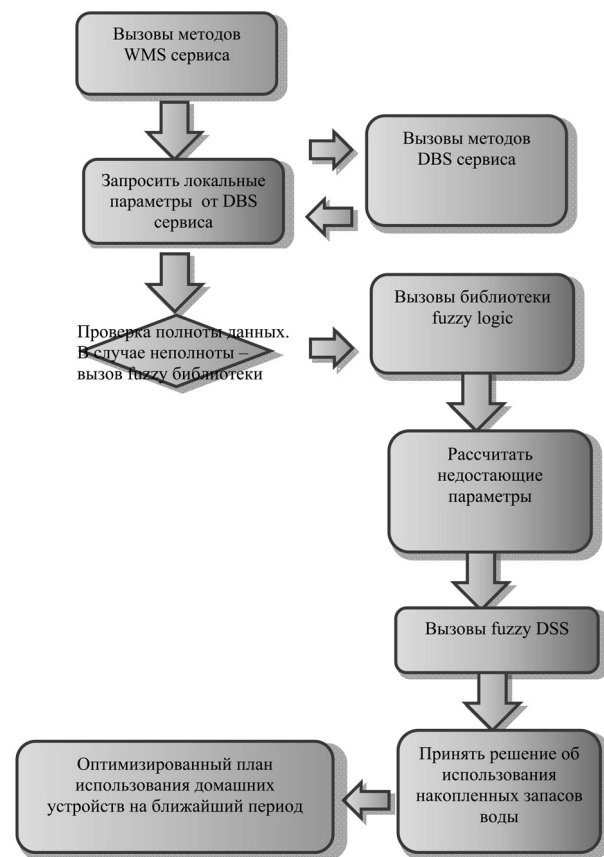


Рис. 2. Алгоритм оптимизации плана с целевой функцией оптимизации водоснабжения

Затраты оптимального водоснабжения по отношению к существующей схеме составляют

$$\Delta = \frac{Z_{\min}}{Z} = (\alpha_0 + \beta_1(1 - \alpha_0)), \quad (7)$$

где $\beta_1 = C_{-1} / C_0$ – относительные затраты на приготовление технической воды по сравнению с бытовой (питьевой), а $\alpha_0 = V_0 / V$ определяет часть питьевой воды в общем объеме потребления.

Относительное снижение затрат при этом

$$\Delta_0 = \Delta - 1 = -(1 - \beta_1)(1 - \alpha_0). \quad (8)$$

Ежесуточное потребление питьевой воды на человека должно составлять по санитарным нормам не менее 2 л, а с учетом потребностей на бытовые нужды (приготовление пищи и мытье посуды), по-видимому, около 5–10 л. Это количество составляет примерно $\alpha_0 \approx 5\text{--}10\%$ от объема потребляемой технической воды, а отношение стоимостей подготовки технической и питьевой воды – $\beta_1 \approx 0,25\text{--}0,5$. При оптимальном способе обеспечения потребителя водой затраты составляют примерно 28–55% (7) от стоимости подготовки воды стандартным способом. Следовательно, изменение способа подачи воды может дать экономию от 45 до 72% средств.

Потребителю можно доставлять только техническую воду и он будет доводить ее до необходимой кондиции с удельными затратами средств C_1 . При этом эти расходы $C_1 = C_0\gamma_1$, где $\gamma_1 \geq 2\text{--}3$, т. е. расходы при индивидуальной подготовке воды потребителем обычно более чем в 2–3 раза выше, чем при ее подготовке централизованным способом. Если потребителю подавать техническую воду, а он будет из нее готовить необходимое количество питьевой воды, то затраты составят

$$Z_{\max} = ((C_1 + C_{-1})\alpha_0 + C_{-1}(1 - \alpha_0))V. \quad (9)$$

Как видно из формул (6), (9), затраты при этом будут выше на приготовление питьевой воды, но поскольку для технических нужд будет использоваться техническая вода, которая подготовлена централизованным способом, то общие затраты могут быть при этом даже меньше, чем при стандартном способе:

$$\Delta_1 = (Z_{\max} - Z_0) / Z_0 = (\gamma_1\alpha_0 + \beta_1(1 - \alpha_0)) - 1, \quad (10)$$

т. е. примерно на 67–25%.

Следует отметить, что при возрастании γ_1 затрат потребителя на подготовку питьевой воды из технической, как видно из соотношения (10), могут возникать ситуации, когда общие затраты будут выше, чем затраты при стандартном способе поставки потребителю только питьевой воды, в том числе и для технических нужд. Это означает, что при использовании общего водовода для подачи технической и питьевой воды экономические затраты могут снизиться на 45–70% при согласовании режимов подачи с режимами потребления технической и питьевой воды. В то же время, если использовать подачу только технической воды и готовить из нее питьевую индивидуально каждым потребителем, затраты могут снизиться примерно на 25–67%. Задачей предлагаемой технологии смарт-грид подготовки воды и является минимизация экономических затрат.

Если $i \in (0, 1)$ обозначить фазовые состояния подаваемой потребителю воды, причем $i = 0$ будет соответствовать подаче питьевой воды, а $i = 1$ – технической, а под $j \in (0, 1)$ понимать те

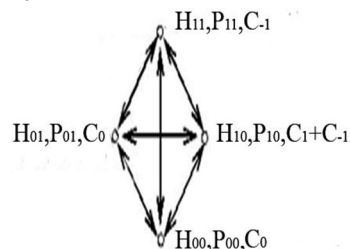


Рис. 3. Граф-схема состояний системы при обеспечении потребителя водой

фазовые состояния воды, потребность в которых имеет потребитель, то все возможные ситуации будут описываться графом переходов (рис. 3).

При этом возможны следующие ситуации: H_{00} – централизованно подается питьевая вода, когда потребителю также необходима питьевая вода, H_{01} – подается питьевая вода, а потребителю в это время необходима техническая вода, H_{11} – подается техническая вода и потребителю необходима в это время техническая вода и H_{10} – подается техническая вода в то время, когда потребителю необходима питьевая вода.

Пусть каждая из ситуаций H_{ij} имеет вероятность p_{ij} . При этом возможны ситуации, когда совпадают потребности в питьевой или технической воде с режимами их подачи (H_{11}, H_{00}) и когда они не совпадают (H_{10}, H_{01}). При несовпадении потребностей с режимом подачи возникают дополнительные затраты: в H_{10} -состоянии затраты C_1 – на индивидуальную подготовку из технической воды питьевой и в H_{01} -состоянии затраты C_0 – за счет использования питьевой воды в качестве технической. Уравнение для затрат на подготовку воды потребителю в общем случае приобретает вид

$$Z(P) = (C_0(p_{00} + p_{01}) + C_1 p_{10} + C_{-1}(p_{11} + p_{10}))V. \quad (11)$$

Если вероятности p_{ij} определить через условные вероятности P_{ij} наступления j -го события при условии, что имели место i -е событие и безусловные вероятности, которые при $i = 0$ равны $p_0 = \alpha_0$, а при $i = 1$ – соответственно $p_1 = 1 - \alpha_0$, то при учете, что $p_{ij} = p_i P_{ij}$, а $p_{00} + p_{01} = p_0 = \alpha_0$, $p_{10} + p_{11} = p_1 = 1 - \alpha_0$, выражение (11) приобретает вид

$$Z(P) = Z_{\min} + C_1(1 - \alpha_0)P_{10}V. \quad (12)$$

Видно, что затраты на подготовку воды превышают минимально возможные затраты на стоимость индивидуальной подготовки из технической воды питьевой.

Изменение затрат по сравнению со стандартным способом подготовки воды составит

$$\Delta(P) = \frac{Z(P) - Z_0}{Z_0} = -(1 - \beta_1)(1 - \alpha_0) + \gamma_1(1 - \alpha_0)P_{10}. \quad (13)$$

Процесс, описываемый графом переходов (рис. 1), в общем случае, относится к классу полумарковских случайных процессов и его математическое описание может основываться на подходах, изложенных в работах [6–8].

Обобщенная модель смарт-грид системы обеспечения потребителя водой. Из природных резервуаров (водоемов, рек и т.п.) вода попадает на станцию очистки, где с использованием различных процедур доводится сначала до качества технической, а при необходимости и питьевой воды. На выходе станции очистки в водопроводную систему в различные интервалы времени суток поступает либо техническая, либо питьевая вода. Она отличается качеством и соответственно затратами средств на ее подготовку. Управляет этим процессом центральный процессор, на который по обратной связи поступает информация от процессоров индивидуальных потребителей о времени использования ими питьевой и технической воды и их расходе. Это позволяет оптимизировать режимы подачи воды по центральному водоводу. В процессе транспортировки по водоводу вода подвергается загрязнению. Они могут быть связаны как с подсосыванием загрязнений извне водовода за счет его дефектов, так и с внутренними загрязнениями, возникающими, например, при переходе от транспорта технической воды к питьевой воде. Вода, поступив к индивидуальному потребителю, контролируется датчиками контроля качества и используется для заполнения буферных резервуаров технической и питьевой воды. В случае необходимости пополнения резервуара питьевой воды при наличии в центральном водоводе технической подключается фильтр очистки воды индивидуального потребителя. Управляет этим процессор индивидуального потребителя. Датчики воды контролируют ее качество как на входе системы, так и на ее выходах для технической и питьевой воды. Буферные резервуары обеспечивают подачу потребителю воды требуемого качества независимо от того, какой тип воды в это время подается по центральному водоводу.

Математическая модель смарт-грид системы водоснабжения. Питьевая вода от технической отличается качеством Q_i , которое является многокритериальной характеристикой, зависящей, в частности, от наличия в воде физических и химических примесей. Качество, по-видимому, необходимо оценивать относительно некоторого выбранного эталона, роль которого не может выполнять дистиллированная вода, традиционно получаемая в процессе опреснения. Существует обширное количество исследований, в которых доказано наличие значимой статистической связи между качеством питьевой воды и количеством долгожителей в регионе. Исследо-

ватели обратили внимание, что в некоторых случаях для источников природной воды этих регионов характерно небольшое содержание ионов кальция (Дагестан, Пакистан). Однако пока еще рано говорить об установлении функциональной связи между качеством воды и ее химико-физическим и структурным составом. Поэтому в первом приближении для упрощения можно полагать качество воды величиной, обратной величине концентрации вредных примесей $Q \approx c^{-1}$. Затраты на подготовку воды $Z = f(c)$ пропорциональны концентрации примесей, а это означает, что они нелинейным образом будут зависеть от требуемого качества воды. При смене порядка подачи питьевой и технической воды происходит изменение концентрации от c_0 до c_1 . Аналогичным образом при переходе от технической воды к питьевой наблюдается обратное изменение концентрации примесей от c_1 до c_0 . Если длина водовода до i потребителя равна l_i , а скорость распространения потока равна V_i , то через время $t_i = l_i / V_i$ этот перепад концентрации дойдет до потребителя. Вследствие явления диффузии происходит размывание концентрации, которое описывается уравнением диффузии (теплопереноса) [9].

Нестационарное уравнение диффузии классифицируется как параболическое дифференциальное уравнение. Оно описывает распространение растворяемого вещества вследствие диффузии или перераспределение температуры тела в результате теплопроводности.

В случае одномерного диффузионного процесса с коэффициентом диффузии (теплопроводности) D уравнение диффузии следующее:

$$\frac{\partial}{\partial t} c(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial}{\partial x} c(x, t) + f(x, t) \quad (14)$$

и при постоянном D оно приобретает вид

$$\frac{\partial}{\partial t} c(x, t) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} c(x, t) + f(x, t), \quad (15)$$

где $c(x, t)$ – концентрация диффундирующего вещества, а $f(x, t)$ – функция, описывающая источники вещества (тепла).

В одномерном случае фундаментальное решение однородного уравнения (при начальном условии, выражаемом дельта-функцией $c(x, 0) = \delta(x)$, и граничном условии $c(\infty, t) = 0$) дано в [9]

$$c(x, t) = \sqrt{\frac{1}{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (16)$$

В этом случае $c(x, t)$ можно интерпретировать как плотность вероятности того, что одна частица, находившаяся в начальный момент времени в исходном пункте, через время t перейдет в пункт с координатой x . В случае произвольного начального распределения $c(x, 0)$ общее решение уравнения диффузии представляется в интегральном виде как свертка

$$c(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(x_1, 0) \sqrt{\frac{1}{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-x_1)^2}{4Dt}\right) dx_1. \quad (17)$$

В случае перехода от режима подачи питьевой воды к технической $c(x_1, 0) = c_0 + (c_1 - c_0)I(x_1)$, где $I(x_1)$ – функция единичного скачка, выражение (17) приобретает вид

$$c(x, t) = c_1 - (c_1 - c_0) \Phi\left(-\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right). \quad (18)$$

Из соотношений (17), (18) следует, что с увеличением времени с момента начала импульса происходит увеличение дисперсии флуктуаций концентрации $\sigma_c^2 = 2Dt$ пропорционально коэффициенту диффузии D , а также $\lim_{x \rightarrow \infty} c(x, t) = c_1$, $\lim_{x \rightarrow -\infty} c(x, t) = c_0$.

Если возмущение концентрации перемещается по трубопроводу со скоростью V_i , то через время t оно будет находиться на расстоянии $m_x = tV_i$:

$$c(x,t) = c_1 - (c_1 - c_0) \Phi\left(-\frac{(x-m_x)}{\sqrt{2Dt}}\right). \quad (19)$$

Из соотношения (19) следует, что $\lim_{t \rightarrow \infty} c(x,t) = c_1$.

Соотношение (17) позволяет проследить изменение концентрации примесей в воде как по сечению трубопровода, так и во времени. В качестве примера на рис. 4 показано, как выглядит нормированное распределение концентраций $\hat{c}(x,t) = c(x,t)/c_1$ при $c_0/c_1 \approx 0$ в различных сечениях в разные моменты времени при переходе от подачи питьевой воды к технической.

Следует отметить, что для получения выражений при переходе от подачи технической воды к питьевой необходимо в выражениях (17) – (19) поменять $c_1 \rightarrow c_0$, а $c_0 \rightarrow c_1$.

Как видно из приведенных соотношений (16), (17), изменение концентрации по пространственным координатам и во времени подчиняется нормальному закону распределения. Однако для такого закона существует положительная, отличная от нуля, вероятность существования неограниченно больших положительных и отрицательных отклонений концентрации относительно медианного значения. Вместе с тем реально они ограничены по величине. Чтобы учесть finiteness реальных величин, можно использовать для описания распределения не гауссову плотность, а плотность распределения, полученную на основе финитных атомарных функций Кравченко – Рвачева [10 – 14].

Базовая финитная атомарная функция $up(\xi)$ является решением дифференциального уравнения [13]:

$$up'(\xi) = 2up(2\xi + 1) - 2up(2\xi - 1). \quad (20)$$

Такую плотность распределения имеет случайная величина:

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} \xi_k 2^{-k}, \quad (21)$$

где $\xi_k \in (-1, 1)$ – равномерно распределенная на интервале от -1 до $+1$ случайная величина. Общий вид случайной величины и порождающей плотность ее распределения дифференциального уравнения можно записать [13] таким образом:

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} \xi_k a^{-k}, \quad h'_a(\xi) = \frac{a^2}{2} (h_a(a\xi + 1) - 2h_a(a\xi - 1)). \quad (22)$$

Уравнение (22) означает, что скорость изменения значений функции $h'_a(\xi)$ в момент времени ξ определяется значениями функции $h_a(\xi)$, сжатой по времени в a раз, в симметрично отстоящие относительно ξ моменты времени $\xi \pm \frac{1}{a}$.

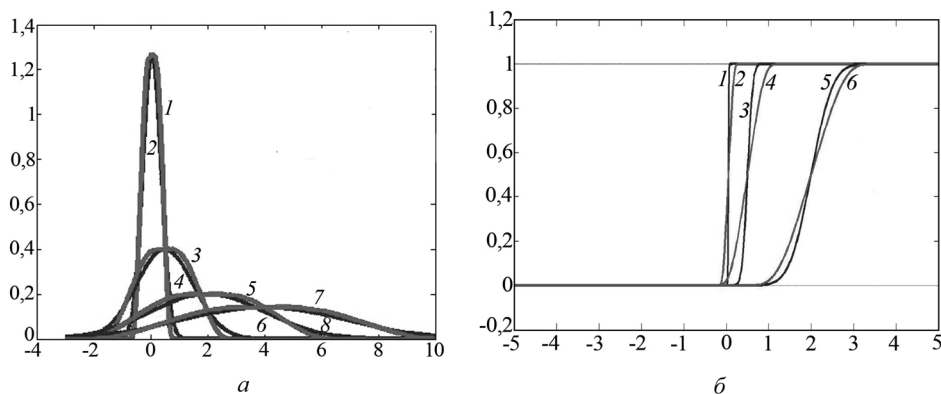


Рис. 4. Распределение плотности (а) и концентрации (б) в различные временные сечения по длине при переходе от питьевой воды к технической: 2, 4, 6, 8 – при использовании гауссовой функции; 1, 3, 5, 7 – при использовании финитных атомарных функций Кравченко; $D=0,1$; $V_0=1$; $\sigma=1$; кривые 1, 2 при $t=0,05$; кривые 3, 4 при $t=0,5$; кривые 5, 6 при $t=2$; кривые 7, 8 при $t=4$

В операторной форме уравнение (22) следующее:

$$h_a(p) = a^2 h_a\left(\frac{p}{a}\right) \frac{sh(p)}{p}. \quad (23)$$

Функции $up(\xi)$, $h_a(\xi)$ относятся к классу атомарных функций. Атомарные функции – это конечные решения функционально-дифференциальных уравнений вида [13]

$$L(y(x)) = \lambda \sum_{k=1}^M C_k y(ax - b_k), \quad (24)$$

где $a \neq 1$, L – линейный дифференциальный оператор с постоянными коэффициентами.

Уравнения (20)–(23) являются частным случаем. Атомарное распределение Кравченко–Рвачева (плотность вероятности $p_x(x)$ случайной величины x) в его первые моменты определяются [13] таким образом:

$$p_x(x) = \frac{1}{b} h_a\left(\frac{x-m}{b}\right), \quad m_x = m, \quad \sigma = \frac{b}{3}. \quad (25)$$

Уравнение (24) в операторной форме запишется так:

$$L(p)y(p) = \lambda y\left(\frac{p}{a}\right) \sum_{k=1}^M C_k \exp(b_k p). \quad (26)$$

Атомарные функции $up(\xi)$ можно использовать для аппроксимации гауссовых функций (16)–(19), которые являются решением уравнения диффузии (теплопереноса) (14). Для этого в уравнениях (16)–(19) необходимо гауссовы плотности заменить на плотности, описываемые атомарной функцией Кравченко – Рвачева [10–14]:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right) \rightarrow up\left(\frac{x-m_x}{b}\right), \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Phi\left(\frac{(x-m_x)}{\sigma}\right) &= \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right) dx \rightarrow \\ &\rightarrow \Phi up\left(\frac{(x-m_x)}{b}\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{b} up\left(\frac{(x-m_x)}{b}\right) dx, \end{aligned} \quad (28)$$

где $m_x = V_0 t$, $b = \sqrt{2\pi\sigma}$.

При этом, как видно из соотношения (25), $b \approx \sigma$, т.е. при аппроксимации гауссова распределения распределением, задаваемым атомарной функцией Кравченко, среднеквадратичные значения их примерно одинаковы.

На рис. 4 показаны аппроксимации для разных временных сечений для ситуации перехода от подачи питьевой к технической воде.

Датчики качества воды для технологий smart-грид. Необходимо создание датчиков, сочетающих приемлемую стоимость с достаточно высокой точностью определения параметров воды. Несмотря на обилие методов и средств контроля качества воды, они не удовлетворяют перечисленным требованиям. Актуальна разработка датчиков, обеспечивающих непрерывный оперативный контроль в сочетании с высокими метрологическими характеристиками и низкой стоимостью, которые позволят обеспечить массовость их применения индивидуальными потребителями. Для их разработки могут использоваться различные физические принципы.

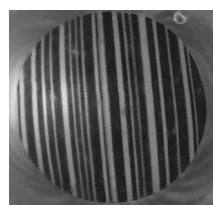
Контроль прозрачности или мутности воды может основываться на регистрации в оптическом диапазоне коэффициентов прохождения и рассеяния света контролируемым образцом воды на нескольких длинах волн. Поскольку помутнение воды обычно сопровождается и изменением ее цвета от голубоватого к желтому, то в сенсорах необходимо использовать несколько длин волн. В частности, в разработанном авторами макете измерителя прозрачности воды использо-

вались 5 длин волн оптического (650 нм – красный, 550 нм – зеленый, 450 нм – синий) и инфракрасного (850 и 940 нм) диапазонов. В датчике 5 излучателей и один широкополосный одноканальный приемник. Измерение затухания на различных длинах волн осуществляется последовательно во времени. Для повышения помехозащищенности от внешних источников освещения используется низкочастотная модуляция источников излучения. Зависимость затухания оптического сигнала от степени загрязненности воды грунтом приведена на рис. 5, а на рис. 6 показано изменение при этом ее прозрачности. Следует отметить, что в достаточно большом диапазоне загрязнений (от 0 до 80%) затухание удовлетворительно описывается линейной зависимостью. Использование многоволнового режима позволяет повысить точность измерений и проводить дифференциацию размеров загрязняющих частиц.

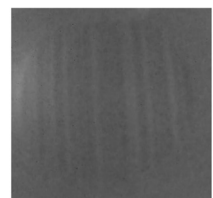
Наличие загрязняющих примесей в воде влияет на ее диэлектрические свойства. Для их выявления могут использоваться методы СВЧ- и КВЧ-диэлектротметрии. Использование высокочувствительного метода капиллярно-волноводного резонанса, впервые предложенного Е. В. Беляковым [15], позволяет обнаруживать наличие в воде микропримесей с концентрациями до 0,1% и, как показали последние исследования, обеспечивает возможность идентификации воды источников различного природного происхождения [3, 4].

Для исследования изменений затухания и резонансной частоты в зависимости от концентрации раствора необходимы измерительные комплексы, обладающие высокой разрешающей способностью по частоте и большим динамическим диапазоном измеряемых поглощений. Авторами создан капиллярно-волноводный резонатор на основе прямоугольного волновода сечением $3,6 \times 1,8 \text{ мм}^2$ и диэлектрического капилляра из фторопласта с внешним диаметром $2r_e = 1,5 \text{ мм}$ и внутренним $2r_i = 1,1 \text{ мм}$, проходящего через широкие стенки волновода. Он работает в миллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda \approx 5 \text{ мм}$). Из-за резонансов, возникающих в многослойном капилляре, внутри которого находится исследуемая жидкость, система оказывается достаточно чувствительной к микропримесям. Кривые резонанса поглощения для различных типов воды приведены на рис. 7.

Видно, что для дистиллята характерно наиболее глубокое резонансное поглощение. Таким образом, частота резонанса, его глубина и добротность могут служить признаками для оценки степени чистоты питьевой воды. Еще одним из высокочувствительных методов, который может использоваться для прямого измерения постоянной составляющей показателя преломления n жидкости, является метод колеблющейся в жидкости струны [2]. Он предполагает использование образцов жидкости, размеры которых превышают или сравнимы с длиной волны в свободном пространстве, на которой проводятся исследования. При этом непосредственно измеряется длина волны λ в жидкости на выбранной частоте f , а следовательно, и реальная часть коэффициента преломления $n = \lambda_0 / \lambda$ (λ_0 – длина волны в свободном пространстве на частоте f). На рис. 8 приведены частота капиллярно-волноводного резонанса и длина волны для различных источников [4]. Дополнительно к измерениям на СВЧ- и в оптическом диапазоне могут производиться и измерения проводимости воды на постоянном токе, которые являются наиболее дешевыми и простыми. Комплексное использование измерений на постоянном токе на многих частотах оптического и микроволнового диапазонов позволит решить задачу создания сенсоров контроля воды. Видно, что по этим параметрам можно различать



Чистая вода



Загрязнение 100%

Рис. 6. Оптическая прозрачность воды

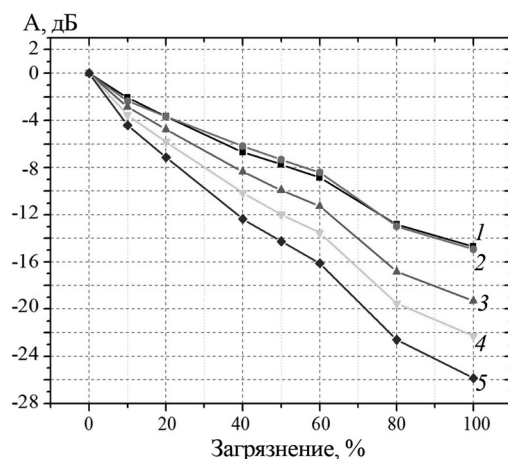


Рис. 5. Зависимость затухания от степени загрязнения воды для разных длин волн оптического и ИК-диапазонов: 1 – 940 нм, 2 – 850 нм, 3 – красный, 4 – зеленый, 5 – синий

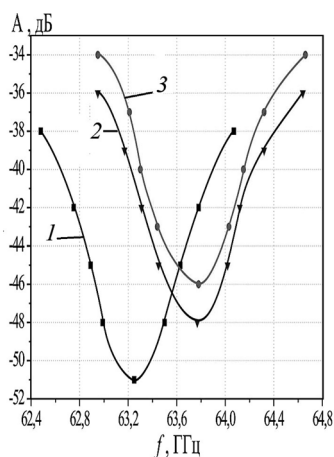


Рис. 7. Характеристики резонансного поглощения разных типов воды: 1 – дистиллят; 2 – талый снег; 3 – водопроводная вода

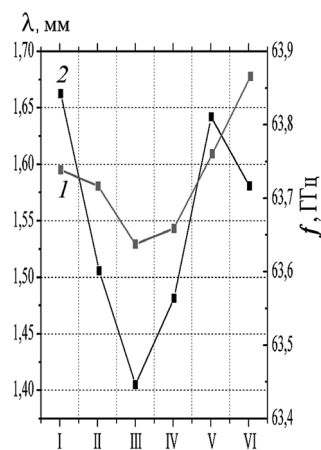


Рис. 8 Длина волны в воде λ и частота резонанса поглощения f : I – Шатиловская (Харьков-1), II – Шестаково (Кременная), III – Роганская (721), IV – Рай-Еленовская, V – дистиллят, VI – водопроводная вода

воду из разных природных источников, а это означает, что данные методы могут быть положены в основу создания достаточно дешевых и точных сенсоров оценки качества воды.

Закключение. Применение принципов временного разделения при подаче в водовод технической и питьевой воды в сочетании с технологиями smart-грид контроля и доводки до необходимого качества воды для отдельных потребителей позволит существенно снизить затраты и служит основой для будущего устойчивого развития общества.

Математическая модель smart-грид системы водоснабжения может строиться с использованием нестационарного уравнения диффузии. Для учета конечности изменения концентрационных зависимостей вместо гауссовых плотностей распределения могут использоваться финитные атомарные функции Кравченко – Рвачева.

Достаточно дешевые и точные сенсоры оценки качества воды могут быть созданы на базе многочастотных оптических (видимого и инфракрасного диапазонов) и микроволновых (сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн) датчиков.

Список используемой литературы

1. Кривенко, Е. В. Использование smart-грид технологий как основы модернизации системы водоснабжения для будущего устойчивого развития общества / Е. В. Кривенко, С. А. Левченко, В. И. Луценко // Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития: конференция 18–21 сентября 2014. Минск, Беларусь. – Минск, 2014.
2. Голубничая, Г. В. Метод непосредственного измерения коэффициента преломления жидкостей в миллиметровом диапазоне / 18-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 8–12 сент., Севастополь, 2008: матер. конф. / Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко. – Севастополь, 2008. – С. 743–744.
3. Идентификация питьевой воды природных источников с использованием их коэффициента преломления в миллиметровом диапазоне / Г. В. Голубничая [и др.] // 21-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 12–16 сент., Севастополь, 2011: матер. конф. – Севастополь, 2011. – С. 1011–1012.
4. Использование двух экспресс-методов идентификации воды природных источников в миллиметровом диапазоне волн / Г. В. Голубничая [и др.] // Радиопизика и электроника. – 2014. – Т. 5 (19), № 2. – С. 94–99.
5. The Refraction Factor in a Millimeter Wave Band for Identification of Potable Water from Natural Sources Authors // The 42 nd European Microwave Conference, 2012, EuMA, 29 Oct. – 1 Nov. 2012, Amsterdam. / G. V. Golubnichaya [et al.]. – Amsterdam, 2012. – P. 1324–1327.
6. Анализ нестационарных сигналов и полей с использованием вложенных полумарковских процессов / В. Ф. Кравченко [и др.] // Докл. РАН. – 2013. – Т. 453, № 2. – С. 1–4.
7. Statistical model of the refractive index of the troposphere / V. F. Kravchenko [et al.] // Universal Journal of Physics and Application. – 2014. – Vol. 2(4). – P. 206–212.
8. Description and analysis of non-stationary signals by nested semi-Markov processes / V.F. Kravchenko, [et al.] // Journal of Measurement Science and Instrumentation. – 2014. – Vol. 5, N3, Sept. 2014, Sum. N 19. – P. 25–32.

9. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики: изд. четвертое, исправленное. Учеб. пособие для университетов / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М., 1972.
10. Рвачев, В. Л. Про одну фінітну функцію / В. Л. Рвачев, В. О. Рвачев // Доповіди академії наук УРСР. Серія А. – 1971. – Вип. 7. – С. 705–707.
11. Atomic Functions in Modern Problems of Radio Physics / V. F. Kravchenko [et al.] // Physical Bases of Instrumentation. November. – 2011. – Special Issue. – P. 3–48.
12. Probability weight functions in problems of radar signals correlation processing / V. F. Kravchenko [et al.] // Journal of Measurement Science and Instrumentation. – 2013. – Vol. 4, N 3.
13. Кравченко, В. Ф. Атомарные функции в теории вероятностей и случайных процессов / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, А. Р. Сафин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 5. – С. 23–37.
14. Новый класс вероятностных весовых функций в цифровой обработке сигналов и изображений / В. Ф. Кравченко О. В. [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 9, – С. 31–44.
15. Беляков, Е. В. СВЧ-установка миллиметрового диапазона длин волн для исследования и контроля концентрации водных растворов / Е. В. Беляков, А. М. Храпко // Электронная техника, сер. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 10, № 394. – С. 34–36.
16. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск, 1982.
17. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях. Вопросы анализа и процедуры принятия решений: сб. переводов под ред. И. Ф. Шахнова / Р. Беллман, Л. Задек. – М.: Мир, 1976. – С. 173–215.
18. Zadeh, L. A. Is there a need for fuzzy logic? / L. A. Zadeh // Information Sciences. – 2008. – P. 2751–2779.
19. Плюта, С. В. Сервисная система управления smart электросетями с нечеткой моделью в условиях неполноты исходных данных: наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития SSF-2014: материалы науч. конф. (18 – 21 сентября 2014 г., г. Минск) / Редкол.: Левченко С. А., Кузей Е. А. / С. В. Плюта, С. А. Левченко. – Минск, 2014. – С. 26–27..
20. Zadeh, L. A. From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions / Zadeh L. A. // IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1999. – Vol. 45. – P. 105–119.
21. Zadeh, L. A. A new direction in AI – toward a computational theory of perceptions / L. A. Zadeh // AI Magazine. – 2001. – N 1. – P. 73–84.
22. Поспелов, Д. А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. – М.: Наука. 1986. – 312 с.
23. Dubois, D. A class of fuzzy measures based on triangular norms / D. Dubois, H. Prade // Int. G. General Systems.– 1982. – Vol. 8. – P. 43–61.
24. Лю, Б. Теория и практика неопределенного программирования. / Б. Лю. – М., 2005. – С. 390.

Поступила в редакцию 24.04.2015