

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.372.413

В. Ф. КРАВЧЕНКО<sup>1</sup>, Е. В. КРИВЕНКО<sup>2</sup>, С. А. ЛЕВЧЕНКО<sup>3</sup>,  
В. И. ЛУЦЕНКО<sup>2</sup>, С. В. ПЛЮТА<sup>3</sup>

СМАРТ-ГРИД ТЕХНОЛОГИИ –  
ОСНОВА МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

(Представлено академиком О. Г. Пенязьковым)

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков

<sup>3</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск

Поступило 09.02.2015

**Введение.** Одной из ключевых проблем XXI в. является обеспечение человечества водой необходимого количества и качества. В связи с этим значительный интерес представляют новые технологии интеллектуальных сетей, получившие название смарт-грид технологии. Такие технологические решения 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 ряд особенностей [2; 3].

Основная идея состоит в использовании общей инфраструктуры для транспортировки как технической, так и питьевой воды при временном разделении этих потоков и доводки для требуемого качества воды уже для каждого индивидуального потребителя, что позволит существенно снизить затраты на обеспечение потребителя водой.

**Необходимость использования смарт-грид технологий для минимизации затрат на обеспечение потребителей водой.** Обычно для подачи воды потребителю используется единая система водоснабжения. Дополнительные системы водоснабжения технической водой в ряде случаев используются для потребителей с большими объемами ее использования и при компактном их расположении, например, в горно-металлургических процессах. Такая вода по содержанию примесей (твёрдых взвесей, эмульсий и растворённых веществ) пригодна для использования в технологических процессах, но непригодна для питья.

Если объем потребляемой питьевой воды составляет  $V_0 = \alpha_0 V$ , а технической  $V_{-1} = \alpha_{-1} V = (1 - \alpha_0) V$  и удельные расходы на подготовку питьевой воды на центральной станции  $C_0$ , технической  $C_{-1}$ , то минимальные затраты по обеспечению потребителей водой составляют

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

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

$$Z = C_0 V. \quad (1)$$

Затраты оптимального водоснабжения в существующей схеме составляют

$$\Delta = \frac{Z_{\min}}{Z} = (\alpha_0 + \beta_1 (1 - \alpha_0)), \quad (2)$$

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

Относительное снижение затрат при этом

$$\Delta_0 = \Delta - 1 = -(1 - \beta_1)(1 - \alpha_0). \quad (3)$$

При оптимальном способе обеспечения потребителя водой затраты составляют (2) примерно 28–55 % от стоимости подготовки воды стандартным способом, т. е. изменение способа подачи воды может дать экономию от 45 до 72 %.

Можно потребителю доставлять только техническую воду и уже он будет доводить ее до необходимой кондиции с удельными затратами средств  $C_1$ . Причем эти расходы  $C_1 = C_0\gamma_1$ , где  $\gamma_1 \geq 2-3$ , 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

$$Z_{\max} = ((C_1 + C_{-1})\alpha_0 + C_{-1}(1 - \alpha_0))V. \quad (4)$$

Как видно из (1), (4) затраты на приготовление питьевой воды при этом будут выше, но поскольку для технических нужд будет использоваться техническая вода, которая приготовлена централизованным способом, то общие затраты могут быть при этом даже меньше, чем при стандартном способе на  $\Delta_1$

$$\Delta_1 = (Z_{\max} - Z_0)/Z_0 = (\gamma_1\alpha_0 + \beta_1(1 - \alpha_0)) - 1, \quad (5)$$

т. е. примерно на 25–67 %.

Следует отметить, что при возрастании затрат потребителя на подготовку питьевой воды из технической  $\gamma_1$ , как видно из соотношения (5), могут возникать ситуации, когда общие затраты будут выше, чем 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 от 25 до 67 %. Задачей предлагаемой smart-грид технологии подготовки воды и является минимизация экономических затрат на подготовку воды нужного качества.

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 фазовые состояния воды, потребность в которых имеет потребитель, то все возможные ситуации будут описываться графом переходов, приведенным на рис. 1. При этом возможны следующие ситуации:  $H_{00}$  – централизованно подается питьевая вода, когда потребителю тоже 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 ( $H_{11}$ ,  $H_{00}$ )

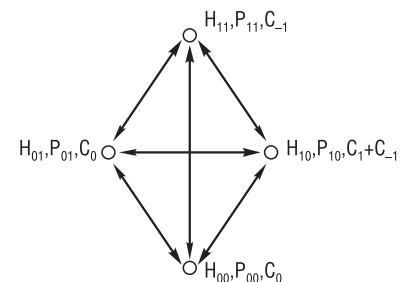


Рис. 1. Граф-схема состояний системы при обеспечении потребителя водой

и когда они не совпадают ( $H_{10}$ ,  $H_{01}$ ). При несовпадении потребностей с режимом подачи возникают дополнительные затраты: в  $H_{10}$  состоянии  $C_1$  – на индивидуальную подготовку из технической воды – питьевой и в  $H_{01}$  состоянии  $C_0$  – за счет использования питьевой воды в качестве технической. Уравнение для затрат на подготовку воды потребителю в общем случае приобретает вид

$$Z(P) = (C_0(p_{00} + p_{01}) + C_1p_{10} + C_{-1}(p_{11} + p_{10}))V. \quad (6)$$

Если вероятности  $p_{ij}$  определить через условные вероятности  $P_{ij}$  наступления  $j$ -го события, при условии, что имело 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, учитывая, 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 (6) приобретает вид

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

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

Изменение затрат по сравнению со стандартным способом подготовки воды составит

$$\Delta(P) = \frac{Z(P) - Z_0}{Z_0} = -(1 - \beta_1)(1 - \alpha_0) + \gamma_1(1 - \alpha_0)P_{10}. \quad (7)$$

При  $\Delta(P_{10} = 0) = -(1 - \beta_1)(1 - \alpha_0)$  (7) совпадает с выражением (3), а при  $\Delta(\max P_{10} = \alpha_0) = (1 - \beta_1)(1 - \alpha_0) + \gamma_1\alpha_0(1 - \alpha_0)$ .

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 [4; 5; 15].

**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. Они отличаются качеством и соответственно затратами средств на их 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 их подачи 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 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 его 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 подачи технической и питьевой воды. Буферные резервуары обеспечивают подачу потребителю воды требуемого качества не зависимо 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, которым не может выступать дистиллированная вода, традиционно получаемая в процессе опреснения. В первом приближении для упрощения можно полагать качество воды величиной обратной концентрации вредных примесей  $Q \approx c^{-1}$ . Затраты на подготовку воды  $C = f(c)$  пропорциональны концентрации примесей, а это означает, что они нелинейным образом будут зависеть от требуемого качества воды. При смене режима подачи с питьевой воды на техническую происходит изменение концентрации с  $c_0$  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  $i$ -го потребителя  $l_i$ , а скорость распространения потока  $V_i$ , то через время  $t_i = \frac{l_i}{V_i}$  этот перепад концентрации дойдет до потребителя. Вследствие явления диффузии происходит размывание концентрации, которое описывается уравнением диффузии (теплопереноса) [6].

В одномерном случае фундаментальное решение однородного уравнения (при начальном условии, выражаемом дельта-функцией  $c(x, 0) = \delta(x)$  и граничном условии  $c(\infty, t) = 0$ ) есть [6]

$$c(x, t) = \sqrt{\frac{1}{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (8)$$

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 свёртка [6]:

$$c(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(x_1, 0) \sqrt{\frac{1}{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-x_1)^2}{4Dt}\right) dx_1. \quad (9)$$

В случае, если происходит переход от режима подачи питьевой воды к технической, то  $c(x_1, 0) = c_0 + (c_1 - c_0)l(x_1)$ , где  $l(x_1)$  – функция единичного скачка, выражение (9) приобретает вид

$$c(x, t) = c_1 - (c_1 - c_0)\Phi\left(-\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right). \quad (10)$$

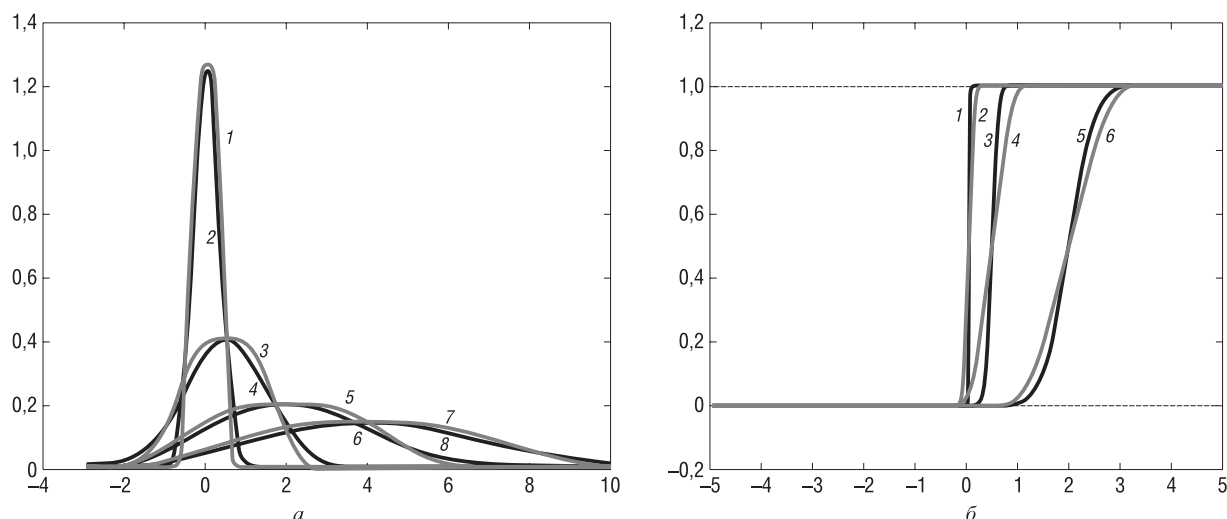


Рис. 2. Распределение плотности (а) и концентрации (б) в различные временные сечения по длине при переходе от питьевой воды к технической: 2, 4, 6, 8 – при использовании гауссовой функции; 1, 3, 5, 7 – при использовании финитных атомарных функций Кравченко;  $D = 0,1$ ;  $V_0 = 1$ ; 1, 2 –  $t = 0,05$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

Из соотношений (9), (10) следует, что с увеличением времени с момента начала импульса происходит увеличение дисперсии флуктуаций концентрации  $\sigma_c^2 = 2Dt$  пропорционально коэффициенту диффузии  $D$ , а также  $\lim_{x \rightarrow \infty} c(x, t) = c_1$ ,  $\lim_{x \rightarrow -\infty} c(x, t) = c_0$ .

Соотношение (9) позволяет проследить изменение концентрации примесей в воде как по сечению трубопровода, так и во времени. В качестве примера на рис. 2 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 (9) поменять  $c_1 \rightarrow c_0$ , а  $c_0 \rightarrow c_1$ .

Как видно из приведенных соотношений (8), (9), изменение концентрации по пространственным координатам и во времени подчиняется нормальному закону распределения. Однако для такого закона распределения 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. Для того чтобы учесть финитность реальных величин, можно использовать для описания распределения не гауссову плотность, а плотность распределения, полученную на основе финитных атомарных функций Кравченко–Рвачева [7–10; 15].

Атомарные функции  $up(\xi)$  можно использовать для аппроксимации гауссовых функций (8), (9), которые являются решением уравнения диффузии (теплопереноса) (8). Для этого в уравнениях (8), (9) необходимо гауссовы плотности заменить на плотности, описываемые атомарной функцией Кравченко–Рвачева [7–10; 15]

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

$$\Phi\left(\frac{x-m_x}{\sigma}\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right) dx \rightarrow$$

$$\Phi up\left(\frac{x-m_x}{b}\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{b} up\left(\frac{x-m_x}{b}\right) dx,$$

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

При этом  $b \approx \sigma$ , т. е. при аппроксимации гауссова распределения, задаваемого атомарной функцией Кравченко, среднеквадратичные значения их примерно одинаковы.

На рис. 2 показаны эти аппроксимации для разных временных сечений для ситуации перехода от подачи питьевой к технической воде. Видно, что в отличие от стандартного закона в этом случае в энергичной области наблюдаются несколько большие значения, в то время как на хвостах они меньше.

**Система управления смарт-грид водоснабжением с применением математики нечетких множеств.** В системах управления интеллектуальным водоснабжением жилых зданий или городских кварталов, в случаях неполноты данных, применяются системы, основанные на математике нечетких множеств (fuzzy sets) и нечеткой логике (fuzzy logics). В ситуациях, когда некоторые параметры функционирования системы не известны 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 оптимизации модели с неизвестными параметрами [14], которые могут быть представлены нечеткими числами. Даже сама цель управления – «обеспечение достаточным количеством», имеет ярко выраженную нечет-

кость в самой постановке [12; 13]. 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

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

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 неградиентные методы поиска оптимума регрессионных моделей [14].

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

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

Или для приближенного случая и перехода к нечетким числам, решение нечеткого полинома вида

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

Таким образом, в случае неполноты данных достигается оптимизированное решение распределения ресурсов для смарт-сетей водоснабжения.

**Заключение.** Применение принципов временного разделения при подаче в водовод технической и питьевой воды в сочетании со смарт-грид технологиями контроля и доводки до необходимого качества воды для отдельных потребителей позволят существенно снизить затраты и служат основой для будущего устойчивого развития общества.

Математическая модель смарт-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.

## Литература

1. Кривенко Е. В., Левченко С. А., Луценко В. И. // Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития. Конференция 18–21 сент. 2014. Минск, 2014. С. 57–61.
2. Golubnichaya G. V., Kirichenko A. Ya., Krivenko E. V., Lutsenko V. I. // The 42nd European Microwave Conference, 2012, EuMA, 29 Oct–1 Nov 2012, Amsterdam. Amsterdam, 2012. P. 1324–1327.
3. Голубничая Г. В., Кириченко А. Я., Кривенко Е. В., Луценко В. И. // Радиофизика и электроника. 2014. Т. 5(19), № 2. С. 94–99.
4. Кравченко В. Ф., Луценко В. И., Масалов С. А., Пустовойт В. И. // ДАН РАН. 2013. Т. 453, № 2. С. 151–154.
5. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O. // J. of Measurement Science and Instrumentation. 2014. Vol. 5, N 3. P. 25–32.
6. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М, 1972. – 735 с.
7. Рвачев В. Л., Рвачев В. О. // Доповіді академії наук УРСР. Серія А. 1971. Вип. 7. С. 705–707.
8. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Пустовойт В. И., Чуриков Д. В. // Физические основы приборостроения: спец. вып. Ноябрь. 2011. С. 3–48.
9. Kravchenko V. F., Churikov D. V., Kravchenko O. V. // J. of Measurement Science and Instrumentation. 2013. Vol. 4, N 3. P. 231–237.
10. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Сафин А. Р. // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 5. С. 23–37.
11. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск, 1982.
12. Беллман Р., Заде Л. // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: сб. переводов / под ред. И. Ф. Шахнова. М., 1976. С. 173–215.
13. Lotfi A. Zadeh // Information Sciences. 2008. Vol. 178. P. 2751–2779.

14. Плюта С. В., Левченко С. А. // Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития SSF-2014: материалы научн. конф. (18–21 сент. 2014 г., г. Минск) / редкол.: С. А. Левченко, Е. А. Кузей. Минск, 2014. С. 26–27.

15. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Пустовойт В. И., Чуриков Д. В. // Раднотехника и електроника. 2014. Т. 59, № 10. С. 949–978.

*V. F. KRAVCHENKO, O. V. KRIVENKO, S. A. LEVCHENKO, V. I. LUTSENKO, S. V. PLUYTA*

kvf-ok@mail.ru; lutsenko@ire.kharkov.ua; lev@hmti.ac.by

## **SMART GRID TECHNOLOGY IS THE BASIS OF MODERNIZATION OF A WATER SUPPLY SYSTEM**

### **Summary**

It is shown that the possibility of using the smart grid technology for organizing a water supply system, which will ensure the future sustainable development of society, is described by the mathematical model.