

Библиографический список

1. Вода питьевая: Гигиенические требования и контроль качества — РСТ 950:2000, Государственный стандарт Узбекистана // Ташкент, 2000. Drinking water. The hygienic requirements and the quality surveillance, Uz DST (Uzbek State Standard), 950:2000.
2. Махмудов, И.Э. Оперативное регулирование изменения концентрации бактерий в водоводах системы питьевого водоснабжения / И.Э. Махмудов // Проблемы механики. — 2008. — №1. — С. 21-23.
3. Махмудов, И.Э. Динамика изменения концентрации бактерий в водоводах при организации подачи постоянного расхода в постоянном по времени притоке воды / И.Э. Махмудов // Проблемы механики. — 2008. — №1. — С. 47-50.

Статья поступила в редакцию 14.03.08.

УДК 628.218

И.Э. Махмудов, канд. техн. наук, руководитель проекта Азиатского Банка развития по водоснабжению, г. Карши, Республика Узбекистан

ДИФфуЗИОННОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В системах питьевого водоснабжения из-за частого перебора работы в напорных водоводах создаются условия увеличения концентрации бактерий в воде. При возобновлении подачи воды концентрация бактерий в воде уменьшается. В статье рассмотрена задача о диффузионном перемешивании воды с различными концентрациями бактерий в напорных водоводах системы питьевого водоснабжения. Получены аналитические выражения для установления величины концентрации бактерий.

Ключевые слова: питьевое водоснабжение, качество воды, численное моделирование

Исследованиями [2] установлено, что на надежность и безопасность питьевого водоснабжения сильное влияние оказывает старение подземных трубопроводных коммуникаций различного назначения и частые нарушения режима водоподдачи потребителям. Снижение надежности и безопасности обусловлены потерями напора и уменьшением пропускной способности из-за накопления отложений в трубах, а также ухудшением физико-химических показателей транспортируемой питьевой воды. Отложения в трубах, способствуя внутренней коррозии, препятствуют поддержанию качества воды на уровне соответствующих нормативов, что создает угрозу здоровья населения. Так называемое вторичное ухудшение качества воды в системах ее подачи и распределения является главным риском безопасности системы питьевого водоснабжения населения. Для прогноза состояния надежности и безопасности систем водоснабжения населения необходимо моделирование изменения концентрации бактерий в водопроводной воде.

Ниже рассмотрим задачу о диффузионном перемешивании воды с различными концентрациями бактерий в напорном водоводе. Свежая вода с концентрацией бактерий c_{np} транспортируется по трубе с радиусом R_{np} и поступает в водовод цилиндрической формы с радиусом R_0 , с объемом воды w_0 , где из-за остановки движения воды концентрация бактерий увеличивается c_0 . Вследствие перемешивания нового объема воды с уже имеющимся происходит изменение концентрации бактерий в водоводе $c(t)$. В момент $t=t_1$ $c_0 > c(t)$ концентрация бактерий достигает величины c^* (безопасная концентрация для потребителя). Поскольку перемешивание идет в цилиндрических трубах с радиусами R_0 и R_{np} (R_0 — радиус подводящей трубы, R_{np} — радиус цилиндрической транспортирующей трубы), предположим, что выравнивание концентрации будет происходить путем молекулярного переноса веществ в области водовода. Тогда происходит диффузионный процесс перемешивания, и уравнение диффузии имеет вид [1]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = \text{div} \vec{i}, \quad (1)$$

где $\vec{j} = cV_r \vec{e}_r + cV_0 \vec{e}_0 - (cV_z + \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z}) \vec{e}_z$; $\vec{i} = cV_{kr} \vec{e}_r$; D —

коэффициент диффузионного переноса; V_0 — скорость притока свежей воды.

Используя (1), на основе диффузионного перемешивания получаем:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \left(-cV_0 - \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \sigma c = f(t) \quad (2)$$

При отсутствии притока свежей воды $f(t)$ уравнение (2) примет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div} \left(-cV_0 - \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \sigma c = 0 \quad (3)$$

Учитывая операцию дивергенцию (3), перепишем в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V_0 \frac{\partial c}{\partial z} + w_0 \frac{\partial c}{\partial r} + \varepsilon_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4)$$

Учитывая малое изменение концентрации бактерий в радиальном направлении и осесимметричность рассматриваемого явления, уравнение (4) можно представить в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V_0 \frac{\partial c}{\partial z} = \varepsilon_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (5)$$

Введем безразмерные параметры $z = R_0 \hat{z}$, $t = \sqrt{\frac{R_0}{g}} \tau$, тогда уравнение (5) примет вид:

$$\sqrt{\frac{g}{R_0}} \frac{\partial c}{\partial \tau} - \frac{V_0}{R_0} \frac{\partial c}{\partial \hat{z}} + \sigma c = \frac{\varepsilon_s}{R_0^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \hat{z}^2} \quad (6)$$

Теперь представим уравнение диффузионного перемешивания в интегральной форме:

$$\frac{d}{dt} \int_{(W)} c_n d\tau = \int_{(W)} q_n d\tau \quad (7)$$

Данное уравнение позволяет получить закономерность сохранения массы бактерий.

Если концентрации постоянны во всем объеме, то концентрация будет только функцией времени $c_n(t)$:

$$\frac{d}{dt} (c_n W) = q_n W = Q_n^* \quad (8)$$

Откуда следует:

$$\frac{dc_n}{dt} W + c_n \frac{dW}{dt} = Q_n^* \quad (9)$$

где $(Q_n^*)_n = (Q_{np})_n + (Q_{\text{ввод}})_n$

Преобразуя (9), имеем: $\frac{dc_n}{dt} + \frac{c_n}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{Q_n^*}{W}$, (10)

где $W(t) = W_0 + \int_{t_0}^t (Q_{np})_n dt$; $Q_{np} = \sum_{n=1}^k (Q_n)_{np}$.

Для решения уравнения (10) принимаем, что приток свежей воды $\frac{dW}{dt} = Q_{np}$, тогда:

$$\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{Q_{np}}{W_0 + \int_{t_0}^t (Q_{np})_n dt}. \quad (11)$$

С учетом постоянства коэффициента диффузии и плотности бактерий во всей области дисперсной системы справедливо равенство:

$$\frac{dc_n}{dt} + c_n \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{Q_{np}}{W}. \quad (12)$$

Принимая условие $\frac{Q_{np}}{W_0} \ll 0$ (W_0 — объем воды на рассматриваемом участке водовода), а также $\frac{dW}{dt} \ll W$ (W — объем притока за время t), получим:

$$\frac{dc_n}{dt} = \frac{Q_{np}}{W}. \quad (13)$$

Слагаемую уравнения (13) определим как:

$$dW = Q dt. \quad (14)$$

Таким образом, уравнения диффузии (10) при $c_n = \text{const}$ и переменном объеме $W(t)$ примет вид:

$$\frac{dc_n}{dt} = \frac{\int_{t_0}^t Q_{np} c_{np} dt - \int_{t_0}^t Q_{on} c_{on} dt}{W_0 (1 + \frac{1}{W_0} \int_{t_0}^t Q_{np} dt)}. \quad (15)$$

Рассмотрим задачу о диффузионном переносе в случае, когда концентрация бактерий постоянно меняется вследствие нового притока воды, тогда уравнение (6) можно записать:

$$\left[\frac{g}{R_0} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{V_0}{R_0} \frac{\partial c}{\partial z} + \sigma c = \frac{\varepsilon_s}{R_0^2} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right]. \quad (16)$$

При переходе в безразмерный вид, делением уравнения (16) на величину $\frac{g}{R_0}$ получим:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \frac{V_0}{\sqrt{g R_0}} \frac{\partial c}{\partial z} + \sigma_1 c = \frac{\varepsilon_s V_0}{R_0 V_0 \sqrt{g R_0}} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \quad (17)$$

где $\sigma_1 = \sqrt{\frac{R_0}{g}} \sigma$.

Здесь F_r — число Фруда ($F_r = \frac{V_0^2}{g R_0}$), ε_s — коэффициент, характеризующий диффузионный перенос с учетом гидравлического сопротивления на трение.

Тогда уравнение (17) с учетом наличия притока и оттока воды из трубы, запишем в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \sqrt{F_r} \frac{\partial c}{\partial z} + \sigma_1 c = -\varepsilon_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - f(\tau), \quad (18)$$

где $\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_s}{R_0 V_0}$; $F_r = \frac{V_0^2}{g R_0}$;

$$f(\tau) = \frac{\int_{t_0}^{\tau} Q_{np} c_{np} d\tau - \int_{t_0}^{\tau} Q_{on} c_{on} d\tau}{W_0 + \sqrt{\frac{R_0}{g}} \left(\int_{t_0}^{\tau} Q_{np} d\tau - \int_{t_0}^{\tau} Q_{on} d\tau \right)} \sqrt{\frac{R_0}{g}}. \quad (19)$$

Изменение концентрации за счет нового притока воды будет иметь вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \sqrt{F_r} \frac{\partial c}{\partial z} = \varepsilon_s \sqrt{F_r} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{\int_{t_0}^{\tau} Q_{np} c_{np} d\tau - \int_{t_0}^{\tau} Q_{on} c_{on} d\tau}{W_0 + \int_{t_0}^{\tau} Q_{np} d\tau - \int_{t_0}^{\tau} Q_{on} d\tau}, \quad (20)$$

где

$$f(\tau) = \frac{\int_{t_0}^{\tau} \hat{Q}_{np}^0 c_{np} d\tau}{W_0 + \hat{Q}_{np}^0 \int_{t_0}^{\tau} \hat{Q}(\tau) d\tau} = \frac{\hat{Q}_{np}^0 \int_{t_0}^{\tau} \hat{Q}_{np}(\tau) c_{np} d\tau - \hat{Q}_{on}^0 \int_{t_0}^{\tau} \hat{Q}_{on}(\tau) c_{on} d\tau}{1 + \hat{Q}_{np}^0 \int_{t_0}^{\tau} \hat{Q}(\tau) d\tau}.$$

Здесь $\hat{Q}^* = \int_{t_0}^{\tau} Q(\tau) d\tau$. Так что уравнение (20) с учетом нового притока воды будет иметь вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \sqrt{F_r} \frac{\partial c}{\partial z} = \varepsilon_s \sqrt{F_r} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + f(\tau). \quad (21)$$

Для решения уравнения (21) введем функцию $F(z)$:

$$c(z, \tau) = e^{-\lambda z} F(z). \quad (22)$$

Учитывая равенство (22), уравнение (21) приводится к виду:

$$-\lambda e^{-\lambda z} F(z) + \sqrt{F_r} \frac{dF}{dz} e^{-\lambda z} + \sigma_1 F = \varepsilon_s \sqrt{F_r} e^{-\lambda z} \frac{d^2 F}{dz^2} + f(\tau)$$

или

$$-\lambda F(z) + \sqrt{F_r} \frac{dF}{dz} = \varepsilon_s \sqrt{F_r} \frac{d^2 F}{dz^2} + c_{np} m_0, \quad (23)$$

где $m_0 = f(\tau) e^{\lambda z}$.

В дальнейшем рассмотрим лишь отсутствие оттока воды $Q_{on}(t) = 0$.

$$\hat{Q}_{np} = \frac{Q_{np}}{W_0} \left| \frac{R_0}{g} \right| = \frac{c_{np} m_0 \lambda e^{\lambda z}}{(c_{np} e^{\lambda z} - m_0)^2}$$

m_0 будет постоянной.

Для упрощения уравнения (23) введем новую функцию:

$$F(z) = \Phi(z) - \frac{m_0}{\lambda} c_{np}, \quad (24)$$

тогда получим:

$$\varepsilon_s \sqrt{F_r} \frac{d^2 \Phi}{dz^2} - \sqrt{F_r} \frac{d\Phi}{dz} + \lambda \Phi = 0. \quad (25)$$

Для определения функции Φ используем следующие граничные условия:

$$\Phi(0) = c_0 + c_{np}; \quad \Phi(L) = c^* + c_{np}.$$

Решения уравнения будем искать в виде:

$$\Phi(z) = e^{\gamma z}.$$

Характеристическое уравнение для λ :

$$\varepsilon_s \sqrt{F_r} \gamma^2 = \sqrt{F_r} \gamma + \lambda = 0. \quad (26)$$

Решая квадратное уравнение (26) имеем:

$$\gamma = \frac{1 \pm \sqrt{D}}{2\varepsilon_s}, \quad (27)$$

где $D > 0$ т.к. $D = 1 - 4\lambda \frac{\varepsilon_s}{\sqrt{F_r}} > 0$.

Фундаментальным решение дифференциального уравнения (25) с учетом равенства (27) будет:

$$\Phi(z) = C_1 e^{\frac{1+\sqrt{D}}{2\varepsilon_s} z} + C_2 e^{\frac{1-\sqrt{D}}{2\varepsilon_s} z}. \quad (28)$$

Коэффициенты выражения (28) определяется как:

$$C_1 + C_2 = c_0 + c_{np};$$

$$C_1 \exp\left(\frac{1+\sqrt{D}}{2\hat{e}_s} \hat{L}\right) + C_2 \exp\left(\frac{1-\sqrt{D}}{2\hat{e}_s} \hat{L}\right) = c^* + c_{np}. \quad (29)$$

Решая линейную систему алгебраических уравнений (22), получим значения для коэффициентов выражения (29):

$$C_1 = c^* + c_{np} - C_2;$$

$$C_2 = \frac{c^* - c_0 + c_{np} \left[1 - \exp\left(\frac{1+\sqrt{D}}{2\hat{e}_s} \hat{L}\right) \right]}{\exp\left(\frac{1-\sqrt{D}}{2\hat{e}_s} \hat{L}\right) - \exp\left(\frac{1+\sqrt{D}}{2\hat{e}_s} \hat{L}\right)}. \quad (30)$$

Таким образом, получено распределение концентрации бактерий в водоводе при наличии нового притока воды:

$$c(\hat{z}, \tau) = \frac{(c_0 + c_{np})}{2sh\sqrt{D}\hat{L}} \left[\exp\left(\frac{(1+\sqrt{D})\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) \exp\left(-\frac{\sqrt{D}\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(-\frac{\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right] + \exp\left(\frac{(1-\sqrt{D})\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) \left[\exp\left(\frac{\sqrt{D}\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(-\frac{\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right]; \quad (31)$$

$$c(\hat{z}, \tau) = \frac{(c_0 + c_{np})}{2sh\sqrt{D}\hat{L}} \left[\exp\left(\frac{\hat{z} + \sqrt{D}(\hat{z} - \sqrt{D}\hat{L})}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(\frac{\hat{z} - \sqrt{D}\hat{z} - \hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right] e^{-\lambda\tau} \quad (32)$$

$$- \exp\left(\frac{\hat{z} + \sqrt{D}\hat{z} - \hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) + \exp\left(\frac{\hat{z} - \sqrt{D}\hat{z} + \sqrt{D}\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(\frac{\hat{z} - \sqrt{D}\hat{z} - \hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right] e^{-\lambda\tau}$$

$$c(\hat{z}, \tau) = \frac{(c_0 + c_{np})}{2sh\sqrt{D}\hat{L}} \left[\exp\left(\frac{\hat{z} - \sqrt{D}(\hat{L} - \hat{z})}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(\frac{\hat{z} - (\hat{L} - \sqrt{D}\hat{z})}{2\hat{e}_s}\right) \right] + \exp\left(\frac{\hat{z} + (\hat{L} - \hat{z})\sqrt{D}}{2\hat{e}_s}\right) - \left[-\exp\left(\frac{\hat{z} - (\hat{L} + \sqrt{D}\hat{z})}{2\hat{e}_s}\right) \right] e^{-\lambda\tau}. \quad (33)$$

Библиографический список

1. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
2. Махмудов, И.Э. Динамика изменения концентрации бактерий в водоводах при организации подачи постоянного расхода в постоянном по времени притоке воды / И.Э. Махмудов // Проблемы механики. — 2008. — №1. — С. 47-50.

Статья поступила в редакцию 20.03.08.

УДК 502.4; 502.7

И.В. Андреева, канд. геогр. наук, н.с. Института водных и экологических проблем, Барнаул
Д.В. Золотов, канд. биол. наук, н.с., Института водных и экологических проблем, Барнаул
И.Н. Ротанова, канд. геогр. наук, доц., зам. директора по научной работе Института водных и экологических проблем, Барнаул

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ НЕКОТОРЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗАКАЗНИКОВ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

В статье анализируется современное экологическое и социально-экономическое состояние территорий ряда заказников Алтайского края. Впервые для региона рассчитаны реальные размеры стоимости ресурсов особо охраняемых природных территорий. Полученные результаты легли в основу оптимизации режимов использования и охраны территорий обследованных заказников.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, природные заказники, экосистемы, природные ресурсы, альтернативная стоимость.

Необходимость обновления документальной базы и поиска путей оптимизации деятельности особо охра-

Принимая $\hat{z} = \hat{L}$, получим распределение концентрации у выхода из водовода:

$$c(\hat{L}, \tau) = \frac{(c_0 + c_{np})}{2sh\sqrt{D}\hat{L}} \left[\exp\left(\frac{\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{D}\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(-\frac{\sqrt{D}\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right] e^{-\lambda\tau}. \quad (34)$$

Откуда определим время достижения концентрации $z = \tau^*$, когда бактерии в водоводе возрастает до допустимой нормы:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{c_0 + c_{np}}{c^*} \left[\exp\left(\frac{\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{D}\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(-\frac{\sqrt{D}\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right] \right] \quad (35)$$

или

$$t = \sqrt{\frac{V_0}{g}} \frac{W_0 + W_{np}}{W_{np}} \ln \left[\frac{c_0 + c_{np}}{c^*} \left[\exp\left(\frac{\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(\frac{\sqrt{D}\hat{z}}{2\hat{e}_s}\right) - \exp\left(-\frac{\sqrt{D}\hat{L}}{2\hat{e}_s}\right) \right] \right].$$

Таким образом, получено распределение концентрации бактерий в водотоке до подачи воды населению. При условии одновременной работы секций притока и оттока:

$$m_0 = \frac{e^{-\lambda\tau} c_{np} \hat{Q}^* \int_0^{\tau} \hat{Q}_{np}(\tau) d\tau - c^* \hat{Q}^* \int_0^{\tau} \hat{Q}_{om}(\tau) d\tau}{1 + \hat{Q}^* \int_0^{\tau} \hat{Q}_{np}(\tau) d\tau - \int_0^{\tau} \hat{Q}_{om}(\tau) d\tau}. \quad (36)$$

Выводы

Уравнение (34) позволяет определить концентрацию бактерий в конечном участке рассматриваемого отсека водовода. С помощью зависимости (35) можно прогнозировать время, за которое в системе водоснабжения вода приобретает безопасное состояние. Зависимость (36) позволяет учитывать изменения гидравлического сопротивления при решении задач по установлению концентрации бактерий в составе питьевой воды.