

УДК 628.35+614.7

Кобылянский В.Я., Петросов В.А., Максимова Е.Э., Василенко С.Л.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА БИОСИСТЕМЫ ВОДОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ПОВРЕЖДАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ**

В практике питьевого водоснабжения эффективность обеззараживания питьевой воды выражается снижением количества микроорганизмов (в процентном отношении) по сравнению с их исходным количеством в воде, поступившей на обработку. Осуществить обеззараживание воды на 100 % обычно не удается [1]. Кроме того, вода подвержена процессам трансформации и вторичного загрязнения при транспортировке от сооружений водоподготовки до потребителей. Поэтому вполне очевиден практический интерес к вопросам разработки моделей, описывающих процессы изменения качества питьевой воды в городских распределительных сетях по микробиологическим показателям. Такие модели должны отвечать особым требованиям при решении многокритериальных оптимизационных задач в области обеспечения нормативного качества питьевой воды.

Рассматривая микробиологическую составляющую многокомпонентной системы городской водораспределительной сети, необходимо выделить в ней подвижную часть в потоке воды и неподвижную (био пленка на поверхности труб) [2]. С позиций санитарной безопасности централизованного водоснабжения городов интерес представляет подвижная часть биологической составляющей, так как она через питьевую воду способна нанести ущерб здоровью потребителя. Очевидно, что и вся система контроля качества воды по микробиологическим показателям направлена на анализ проб воды. Исследование био пленок проводится в исключительных случаях, как правило, при изучении процессов биокоррозии в трубах [3].

Рассматриваемая в настоящей работе математическая модель касается микробиологической составляющей, находящейся непосредственно в воде и определяемой через показатель, нормируемый стандартом на питьевую воду [4] – так называемый коли-индекс, который не должен быть больше 3. Численно величина этого показателя равна числу бактерий кишечной палочки в 1 литре воды. Основным повреждающим фактором, который поддается контролю и регулированию, для микробиологической составляющей служит дезинфектант, в нашем случае – это хлор. Стандарт на питьевую воду устанавливает низшую допустимую концентрацию хлора в питьевой воде перед ее поступлением в распределительную сеть, которая считается достаточной для инактивации микроорганизмов в воде. Таким образом, используя нормативные величины, которые прошли многолетнюю апробацию и общепризнанны, для величин повреждающего воздействия (концентрация хлора) и отклика биосистемы (коли-индекс) можно установить два уровня:

- соответствует стандарту (на рис. 1 и рис. 2 – уровень 0);
- не соответствует стандарту (на рис. 1 и рис. 2 – уровень 1).

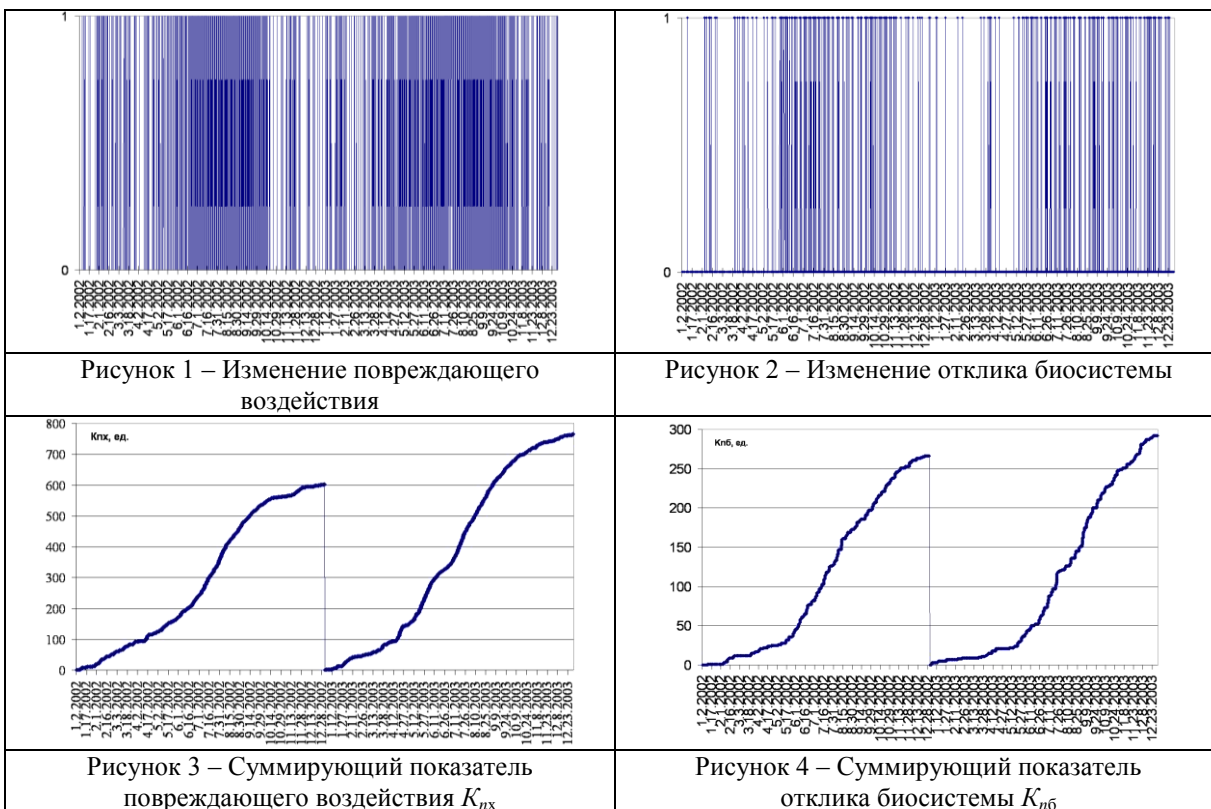
Поскольку качество поступающей в город питьевой воды по исследуемому показателю коли-индекс полностью соответствует ГОСТ 2874-82 "Вода питьевая", можно предположить, что микробиологическая составляющая формируется непосредственно в водораспределительной сети. При этом основным воздействующим на нее фактором – концентрация дезинфектанта. Последний после поступления воды в сеть больше не вводится, поэтому в первом приближении можно утверждать, что отклик биосистемы является результатом воздействия повреждающего фактора, интенсивность которого (в нашем случае – это концентрация хлора) известна и определяется на входе в водораспределительную сеть. Отметим, что интенсивность повреждающего фактора по сети

может существенно уменьшиться, но в нашей модели это не учитывается, так как нормативная база для сравнения отсутствует.

В нашем исследовании отклик биосистемы фиксировался ежедневно в нескольких точках сети. Концентрация хлора также определялась ежедневно в точках поступления воды в город. Массив данных по коли-индексу составил 10 550 измерений, по хлору – 5 230 измерений. Результаты исследования показаны на рис.1 и рис. 2, где более высокой плотности штриховки соответствует большая частота обнаружения контролируемых параметров 1-го уровня. Для количественной оценки изменения числа откликов биосистемы на колебания уровня дезинфектанта в работе [5] введен суммирующий показатель  $K_n = \sum_{i=1}^n K_i$ , где  $K_i$  – количество нестандартных проб, зафиксированных в  $i$ -й

день;  $n = 1 \div 365$  – дни в году.

Суммирующие показатели для хлора  $K_{nx}$  и коли-индекса  $K_{nb}$  приведены соответственно на рис. 3 и рис. 4.



Явно выраженная нелинейность кривых суммирующих показателей позволяет представить их в виде последовательности прямых отрезков длиной  $l$  и с соответствующим углом наклона  $\alpha$  по отношению к оси  $x$ . Чем больше угол наклона, тем выше скорость изменения числа нестандартных проб, которую обозначим для коли-индекса  $V_6$  и для активного хлора  $V_x$ :

$$V_6 = \Delta K_{nb} / \Delta t_6; \tag{1}$$

$$V_x = \Delta K_{nx} / \Delta t_x, \tag{2}$$

где  $\Delta t_6 = 5$  дней,  $\Delta t_x = 3$  дня – периоды времени изменения соответственно  $K_{nb}$  и  $K_{nx}$ .

Для уравнивания объемов выборки преобразованные в величины  $V_x$  и  $V_b$  массивы данных для хлора и коли-индекса были приведены к нормированному отклонению  $x'_{HO}$  по формуле:

$$x'_{HO} = (x_i - \bar{x}) / s_x, \quad (3)$$

где  $x_i$  – текущее значение измеряемого показателя;  $\bar{x}$ ,  $s_x$  – его среднее арифметическое значение и среднеквадратическое отклонение.

Нормированное отклонение  $x'_{i1}$  позволяет сравнивать отклонения отдельных вариант разных признаков от среднего уровня [6]. Графики величин  $V_{xH}$  и  $V_{bH}$ , нормированных по формуле (3), показаны на рис. 5 и рис. 6.

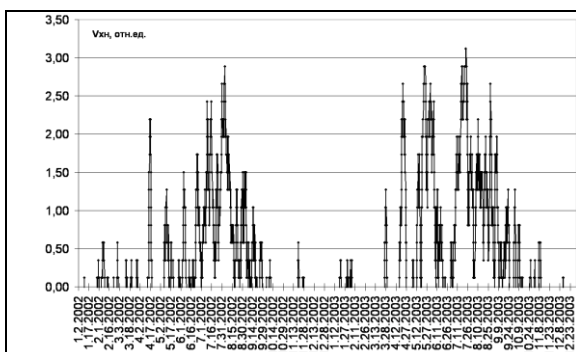


Рисунок 5 – Показатель нормированного отклонения  $V_{xH}$

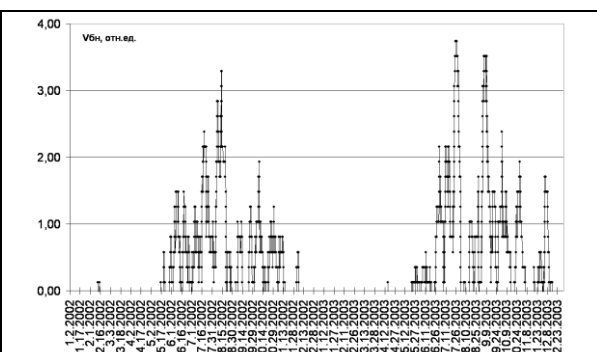


Рисунок 6 – Показатель нормированного отклонения  $V_{bH}$

Пиковые значения величины  $V_{bH}$  указывают на четко выраженный отклик биосистемы сети на изменение концентрации дезинфектанта. Анализ графиков по пиковым значениям позволяет определить синхронность процессов изменения скоростей  $V_{bH}$  и  $V_{xH}$  и времена  $t_i$  запаздывания реакции биосистемы на повреждающее воздействие.

В работе [5] показано, что инерционность водораспределительной сети по бактериологическим показателям по отношению к изменениям концентрации остаточного хлора составляет по пиковым значениям 10-27 суток. В нашем случае нижний предел по времени запаздывания составил 5 дней (в июле 2003 года), что, возможно, определялось совпадением температурного максимума и резкого увеличения мутности воды, роль которой отмечалась и ранее [5].

Графики, приведенные на рис. 3 - рис. 6, показывают, что поведение исследуемых характеристик имеет четко выраженный сезонный характер: в зимний период динамика изменений резко отличается от летней динамики. Эта особенность может быть объяснена тем, что, во-первых, с уменьшением температуры воды снижается ее хлорпоглощаемость, то есть концентрация хлора в воде становится более стабильной. Во-вторых, понижение температуры замедляет биологические процессы.

Каждую из кривых на рис. 3 и рис. 4 можно приближенно представить в виде суммы двух экспонент (возрастающей и убывающей):

$$y(n) = h(n_0 - n)c(e^{dx} - 1) + h(n - n_0)k[1 - e^{-a(x-b)}], \quad (4)$$

где  $h(\xi)$  – единичная функция Хевисайда,  $n_0$  – точка соприкосновения экспонент и перелома непрерывной функции  $y(n)$ .

В точке  $n_0$  сами экспоненты и их первые производные равны между собой, поэтому два коэффициента в уравнении (4) связаны аналитическими зависимостями:

$$b = x_0 - \frac{1}{a} \ln \left[ \frac{a}{d} (1 - e^{-dx_0}) + 1 \right], \quad c = k \frac{1 - e^{-a(x_0 - b)}}{e^{dx_0} - 1}.$$

Остальные параметры  $\theta = \{a, d, k, x_0\}$  можно найти по экспериментальным кривым методом наименьших квадратов.

Характер кривых позволяет предположить, что сдвиг точки перелома во времени для микробиологической составляющей (рис. 4) по сравнению с таковой для дезинфектанта (рис. 3) является одной из характеристик инерционности отклика для биосистемы водопроводной сети на повреждающее воздействие. Для 2002 года такой сдвиг составил 5 дней, для 2003 года – 30 дней.

**Выводы.** Разработанная модель дает механизм оценки бактериологической устойчивости водораспределительной сети в условиях вероятного внешнего и внутреннего вторичного микробиологического загрязнения при колебаниях фактора повреждающего воздействия, регулируемого в технологии питьевой водоподготовки. Модель позволяет прогнозировать поведение микробиологической составляющей путем расчета такого показателя динамики повреждающего фактора, как скорость его изменения. Для использования предлагаемой модели в практике водоснабжения нет необходимости проводить дополнительные измерения качества питьевой воды. Достаточно придерживаться традиционного плана контроля, которым предусмотрена мониторинговая оценка концентрации активного хлора на ключевых объектах водоснабжения и содержания бактерий группы кишечной палочки по схеме, репрезентативной для конкретной системы водоснабжения.

#### Литература

1. Гончарук В.В., Потапченко Н.Г. Современное состояние проблемы обеззараживания питьевой воды // Химия и технология воды. – 1998. – Т. 20, № 2. – С. 190-217.
2. Persistence of two model enteric viruses (B40-8 and MS-2 Bacteriophages) in water distribution pipe biofilms // Water Sci. Technol. – 2001. – Vol. 43, N 12. – P. 133-138.
3. Рябченко В.А., Русанова Н.А., Коробейникова Л.И. Современные методы борьбы с биологическими обрастаниями и отложениями в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М.: ЦБНТИ МЖКХ РСФСР, 1976. – 64 с.
4. ГОСТ 2874-82 "Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством" // Вода питна: Нормативні документи. Довідник. – Львів: Леонорм, 2001. – С.13-17.
5. Максимова Е.Э., Колотило В.Д., Кобылянский В.Я. Оценка инерционности водораспределительной системы при обеззараживании питьевой воды // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2004. – Вип. 29. – С.184-190.
6. Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.

УДК 628.35+614.7

Кобилянський В.Я., Петросов В.А., Максимова О.Е., Василенко С.Л.

#### **МОДЕЛЮВАННЯ ВІДГУКУ БІОСИСТЕМИ ВОДРОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ НА ПОШКОДЖУЮЧУ ДІЮ**

У статті викладений підхід до розробки математичної моделі, що описує процеси формування якості питної води за микробиологічними показниками у міській водо-

Да

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

---

розподільчій системі при значних коливаннях основного інактивуєчого агенту – активного хлору.