

Модель остаточного ресурса инженерных систем с высоким уровнем износа

Старший преподаватель Т.Н. Солдатенко,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Ключевые слова: состояние объектов инженерных систем; остаточный ресурс; функция принадлежности; индивидуальное прогнозирование

Одним из важнейших условий социально-экономического развития страны является устойчивость оказания социальных услуг, в том числе жилищно-коммунальных, к которым относятся горячее и холодное водоснабжение, теплоснабжение и т. д. [1]. Они реализуются в ходе деятельности социально-экономических систем коммунального хозяйства, которое переживает в настоящее время крайне сложный и ответственный период реформирования. Нормативные требования к уровню оказания жилищно-коммунальных услуг достаточно высоки [2]. Для их выполнения необходимо обеспечить не только требуемую прочность конструкций зданий и сооружений [3], но и работоспособность объектов инженерных систем (ОИС) [4, 5]. Для этого необходимо определять текущее техническое состояние ОИС и прогнозировать величину остаточного ресурса для исключения достижения этими объектами своего предельного состояния [6, 7]. О важности решения этой задачи говорит появление нового нормативного документа [8].

Однако в последние годы наблюдается усложнение условий поддержания работоспособности ОИС в силу существенного повышения уровня неопределенности в деятельности управляющих зданиями организаций. Основными причинами этой ситуации являются происходящие в нашей стране социально-экономические изменения. Во-первых, функционирование социально-экономических систем коммунального хозяйства происходит в условиях усиливающейся конкурентной среды и децентрализации предприятий коммунального хозяйства. Это резко снижает возможности обобщения статистических данных об однотипных ОИС для прогнозирования наступления их предельного состояния. Во-вторых, значительная часть объектов инженерных систем, с помощью которых обеспечивается предоставление коммунальных услуг потребителям, имеет существенный физический и моральный износ. По данным Министерства регионального развития РФ в среднем по России физический износ котельных достиг 55%, коммунальных сетей водопровода – 65%, канализации и тепловых сетей – 63%, электрических сетей – 58%, водопроводных насосных станций – 65%, канализационных насосных станций – 57%, очистных сооружений водопровода – 54% и канализации – 56%. По отдельным муниципальным образованиям износ коммунальной инфраструктуры составляет 70-80% и увеличивается на 2-3% в год. Около 30% основных фондов коммунального хозяйства уже полностью отслужили нормативные сроки. Это снижает возможности по планированию и осуществлению необходимых управляющих мероприятий технической эксплуатации применительно к объектам инженерных систем и конструкциям зданий и сооружений [9]. Выходом из создавшегося положения является применение методов индивидуального прогнозирования остаточного ресурса ОИС. При этом дополнить ограниченную ретроспективную и текущую информацию о состоянии объектов инженерных систем в значительном большинстве случаев могут только эксперты.

Для снижения уровня неопределенности при эксплуатации зданий и сооружений [10, 11], а также их инженерных сетей и систем, в последние годы на основе экспертных заключений разработано несколько перспективных подходов [12, 13, 14, 15]. Их отличает использование аппарата нечеткой логики для определения оценки состояния объектов по результатам обследования систем зданий. Однако вопросы индивидуального прогнозирования остаточных ресурсов объектов инженерных систем в условиях существенной неопределенности в известной литературе рассмотрены недостаточно полно [16, 17]. Новизной рассматриваемой в статье параметрической модели определения остаточных ресурсов ОИС является совместное использование ретроспективной и текущей информации о наблюдаемом тренде состояния объекта и экспертных заключений о возможных (нечетких) значениях границ его предельного состояния. Такой подход является актуальным для современного состояния системы технического обслуживания и ремонта зданий и сооружений. Он позволяет более эффективно расширять информационную базу принятия решений о планировании и проведении необходимых управляющих воздействий на объекты инженерного оборудования зданий и сооружений по сравнению с другими известными методами [18, 19].

Солдатенко Т.Н. Модель остаточного ресурса инженерных систем с высоким уровнем износа

Объектом рассмотрения в настоящей статье выступают инженерные системы зданий. Предметом исследования является остаточный ресурс до достижения указанными объектами своего предельного состояния. Практическая значимость получаемых результатов состоит в том, что при рассмотренном подходе создаются предпосылки к повышению объективности подготовки и принятия решений предприятиями коммунального хозяйства по обеспечению устойчивости оказания коммунальных услуг. Перейдем к изложению существа предлагаемого подхода.

При разработке модели для индивидуального прогноза изменения технического состояния ОИС зданий и сооружений использовались определенные теоретические и экспериментальные предпосылки.

Теоретические предпосылки разработки модели индивидуального прогноза остаточного ресурса объектов инженерных систем

Для обоснования вида математической модели предполагается, что техническое состояние ОИС характеризует доступный для контроля параметр $y(t)$ или совокупность параметров, изменяющихся независимо друг от друга. Описание процесса изменения $y(t)$ позволяет оценить величину остаточного ресурса ОИС по событию пересечения параметром его границ поля допуска (ГПД). Для конкретных типов ОИС значения интервала $\Delta_{ПД}$ ГПД задаются техническими условиями (ТУ), в которых указываются предельные значения нижней y_n и верхней y_v границ поля допуска [20]. В нормативных документах и научной литературе $\Delta_{ПД}$ в настоящее время рассматривается как неизменный во времени показатель, описываемый в терминах классической («четкой») математики [4, 6, 16]. В то же время результаты анализа эксплуатации достаточно большого числа сложных технических объектов [21] показывают, что при высокой степени их износа границы $\Delta_{ПД}$ по техническим условиям могут не в полной мере соответствовать допущению об их неизменности. Оценки $\Delta_{ПД}$ могут уточняться экспертными методами [22]. Это обстоятельство можно использовать для уточнения показателей остаточного ресурса ОИС и расширения возможностей по управлению состоянием комплекса ОИС здания в условиях финансовых и временных ограничений.

Экспериментальная база математического моделирования остаточного ресурса ОИС

Для принятия решения о классе модели остаточного ресурса в соответствии с предпосылками ее создания было проведено экспериментальное обследование крупной инженерной системы теплоснабжения комплекса производственных и жилых зданий. Объектами исследования выступили установки различного назначения и типов, в том числе: подпиточные насосы типа 4АН180МЧУ3; конденсатные насосы типа 1КС-20-50 АИРП2М243; питательные насосы типа ЦНСГ-38-154 АИР180М2У3; сетевые насосы типа Д315-71; насосы горячего водоснабжения «Grandforce» различной производительности (фото на рис. 1 и рис. 2).



Рисунок 1. Обследуемый ОИС с высоким уровнем расхода установленного ресурса



Рисунок 2. Общий вид одной из подсистем теплоснабжения

Для анализируемых ОИС исследовались параметры, которые в соответствии с эксплуатационной документацией характеризуют техническое состояние объектов. Для данного класса ОИС инженерной системы теплоснабжения основными являются параметры вибрации: виброскорость, виброперемещение и температура подшипникового узла [23]. Для мониторинга состояния ОИС использовались средства неразрушающего контроля: пирометр и виброметр.

На основе обобщения эксплуатационных данных установлено, что сроки эксплуатации ряда ОИС значительно превышают установленные по техническим условиям, на них проведены как плановые, так и неплановые ремонты. Кроме этого, сделаны выводы о монотонности процессов изменения параметров их состояния и возможности экспертного оценивания ГПД для ОИС, имеющих высокий расход ресурса.

Аналитическое описание модели остаточного ресурса ОИС

При решении задачи прогнозирования остаточного ресурса ОИС зданий можно выделить два этапа: первый этап – разработка модели процесса изменения состояния ОИС; второй этап – идентификация разработанной модели по имеющимся данным [24, 25]. Установим, что показатели модели параметра $y(t)$ должны характеризовать тенденцию к постепенному ухудшению состояния ОИС и приближению его к ГПД. При этом модель параметра $y(t)$ должна быть по возможности достаточно простой и позволять комплексное использование ретроспективных и текущих данных о параметре с экспертными заключениями о свойствах ОИС. Перечисленным требованиям удовлетворяет следующий подход к моделированию. Введем предположение о том, что одномерный закон распределения $y(t)$ в каждом из сечений времени является нормальным с переменным математическим ожиданием и дисперсией. Результаты проведенного эксперимента позволили обосновать, что математическое ожидание параметра $y(t)$ может быть описано регрессионной моделью $y_{np}(t)$ его тренда в следующей форме:

$$y_{np}(t) = d_0 + d_1 \cdot t + \varepsilon, \quad (1)$$

где d_0 , d_1 – коэффициенты уравнения регрессии; ε – нормально распределенная величина погрешности прогнозирования.

Первых два слагаемых в модели (1) характеризуют неустранимое ухудшение ОИС, обусловленное факторами старения и неблагоприятного воздействия среды функционирования ОИС. Предположим, что с некоторой периодичностью проведено n измерений параметра $y(t)$. Как правило, контроль состояния параметров ОИС зданий предусматривается конструкторской и эксплуатационной документацией в рамках системы технического обслуживания и ремонтов зданий и сооружений и используется в расчетах стратегий управления состоянием этих объектов [7, 26]. В случае необходимости возможно проведение специально организованного мониторинга ОИС, хотя это и требует дополнительных затрат. Достижение предельного состояния ОИС количественно характеризуется вероятностью и временем пересечения параметром $y(t)$ его ГПД на заданном интервале времени. Оценки коэффициентов d_0 , d_1 могут быть сравнительно просто получены по известным соотношениям [27] на основе накопленной ретроспективной информации о состоянии ОИС за n предыдущих интервалов времени. Это является достоинством рассматриваемой модели.

Пусть показатели y_n и y_v ГПД представляют собой нечеткие числа \underline{y}_n и \underline{y}_v . В этом случае ГПД параметра $y(t)$ является также нечеткой величиной $\underline{\Delta}_{ГПД}$, которая имеет следующее представление:

$$\underline{\Delta}_{ГПД}(y(t)) = \left\{ \underline{\Delta}_{ГПД}, \mu(\underline{\Delta}_{ГПД}(y(t))) \right\}, \quad (2)$$

где $\mu(\underline{\Delta}_{ГПД}(y(t)))$ – функция принадлежности $\underline{\Delta}_{ГПД}$.

Методика прямого экспертного оценивания функций принадлежности нечетких множеств \tilde{y}_H и \tilde{y}_B ГПД $\tilde{\Delta}_{ПД}$ параметра $y(t)$ достаточно подробно рассмотрена в известной литературе по теории нечеткой математики [28]. Для соотношения (2) необходимо использовать по возможности наиболее простые ФП, например LR-типа, колоколообразные и иные с небольшим числом параметров. При сделанных допущениях вероятность $\tilde{P}(t)$ невыхода $y_{np}(t)$ за нечеткие ГПД $\tilde{\Delta}_{ПД}$ на интервале $[0, t]$ имеет следующий вид:

$$\tilde{P}(t) = BEP\left\{\tilde{y}_H \leq y_{np}(t) \leq \tilde{y}_B\right\} = \int_{\tilde{y}_H}^{\tilde{y}_B} w(x, t) dx, \quad (3)$$

где $w(x, t)$ – одномерная плотность распределения значения параметра $y(t)$ в момент времени прогноза t , которая при сделанных допущениях имеет вид:

$$w(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot D[y_{np}(t)]}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - y_{np}(t))^2}{2 \cdot D[y_{np}(t)]}\right). \quad (4)$$

Оценка дисперсии $D[y_{np}(t)]$ прогноза вычисляется с помощью соотношения:

$$D[y_{np}(t)] = \left[\frac{n+1}{n} + \frac{3 \cdot (n+2 \cdot n_{np} - 1)^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \right] \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (y(t_i) - y_{np}(t_i))^2}{n - 2}, \quad (5)$$

где n_{np} – значение горизонта прогноза.

Нечетко-статистическая оценка $\tilde{t}^{(OP)}$ остаточного ресурса ОИС до достижения предельного состояния при использовании предлагаемой модели индивидуального прогноза изменения технического состояния конкретного ОИС определяется из условия:

$$\tilde{P}(\tilde{t}^{(OP)}) = \tilde{P}^{(zp)}, \quad (6)$$

где $\tilde{P}^{(zp)}$ – граничное значение для нечеткой вероятности $\tilde{P}(t)$, устанавливаемое экспертным способом.

Граничное значение $\tilde{P}^{(zp)}$ является своего рода аналогом γ -вероятности, применяемой для оценивания γ -процентного уровня расхода ресурса технического объекта [29]. Отличие состоит в его нечетком характере, что позволяет использовать опыт и знания экспертов применительно к конкретным условиям эксплуатации ОИС. Рассмотрим применение модели остаточного ресурса и способа идентификации ее компонентов на расчетном примере.

Расчетный пример

Дано

Пусть техническое состояние объекта инженерной системы характеризуется параметром $y(t)$ с двухсторонним полем допуска, имеющим следующие границы по ТУ $y_{TY}^{(H)} = 230$ и $y_{TY}^{(B)} = 290$.

Экспертные оценки ГПД оценены как нечеткие числа $\tilde{y}^{(H)}$ и $\tilde{y}^{(E)}$ с колоколообразными ФП. Значения экспертно установленных границ находятся в интервале $[210,310]$. Ретроспективные результаты контроля параметра $y(t)$ приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Номер интервала контроля	Результат контроля параметра
1	258,00
2	263,00
3	268,00
4	267,00
5	271,00
6	278,00

Необходимо

Получить оценки остаточного ресурса рассматриваемого ОИС.

Решение

Для исходных данных, приведенных в табл. 1, получены следующие оценки коэффициентов регрессии $d_0 = 255,20$, $d_1 = 3,51$. Характер изменения экспериментальных и расчетных данных приведен на рис. 3.

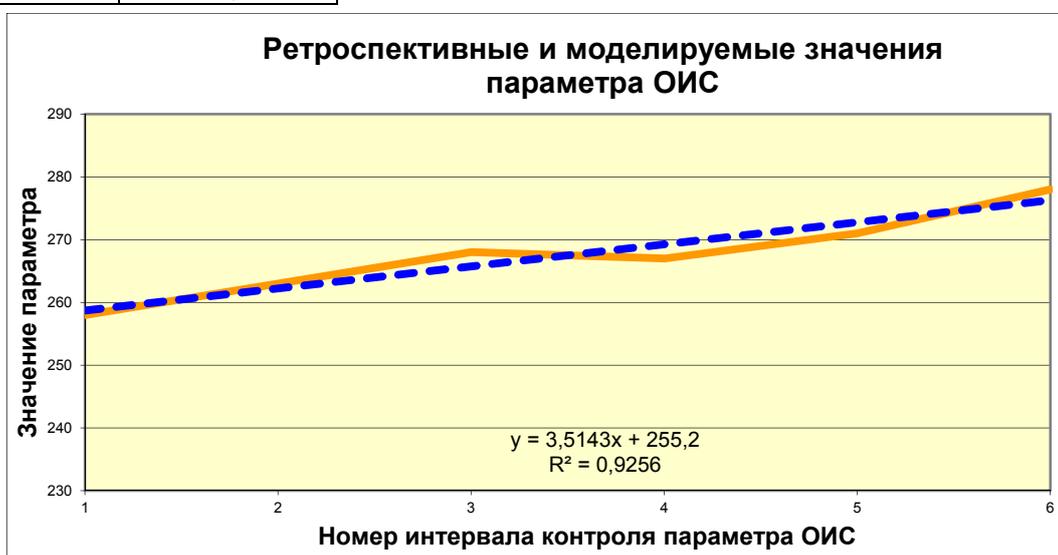


Рисунок 3. Характер изменения экспериментальных и расчетных данных



Рисунок 4. Одномерные законы распределения моделируемых значений параметра по интервалам прогноза

Вид одномерных плотностей распределения $w(x, n_{np})$ значений параметра $y(t)$ по горизонту n_{np} прогноза при установленных в модели допущениях представлен на графиках рис. 4.

Графики, представленные на рис. 6, отражают тенденцию к снижению точности прогноза (увеличение разброса значений параметра при увеличении горизонта прогноза). Результаты расчета нечеткой вероятности $\tilde{P}(t)$ невыхода параметра ОИС за экспертно установленные ГПД для конкретного сечения времени прогноза представлены на рис. 5.

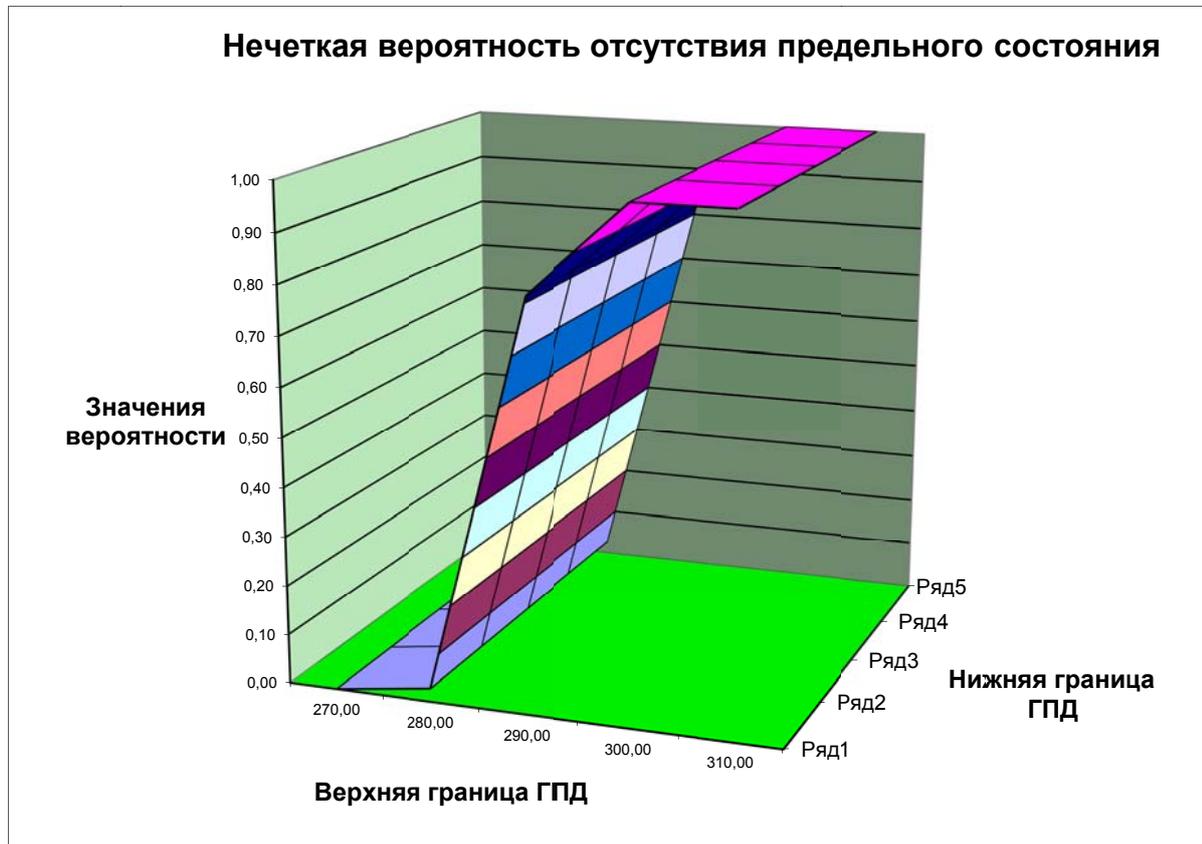


Рисунок 5. Нечеткая вероятность невыхода параметра ОИС за экспертно установленные ГПД при конкретном сечении времени прогноза

Расчетная вероятность $\tilde{P}(t)$ представляет собой поверхность в трехмерном пространстве. Динамика изменения нечеткой вероятности $\tilde{P}(t)$ недостижения ОИС своего предельного состояния при нескольких значениях интервалов прогноза в соответствии с разработанной моделью (2) и (3) представлена на рис. 6.

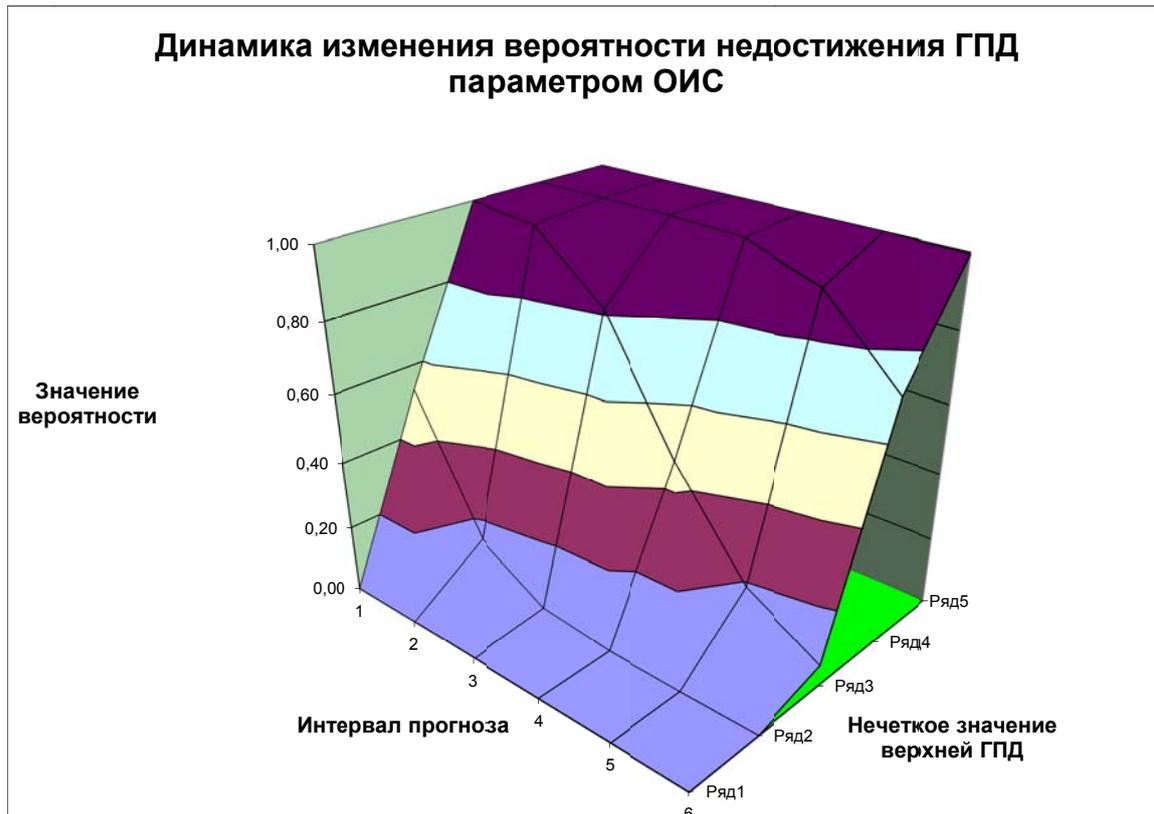


Рисунок 6. Динамика изменения нечеткой вероятности отсутствия предельного состояния ОИС в зависимости от величины интервала прогноза и нечеткой верхней ГПД

Решение задачи определения оценки величины $\tilde{t}^{(OP)}$ остаточного ресурса ОИС в соответствии с соотношением (6) иллюстрируется графиком на рис. 7.

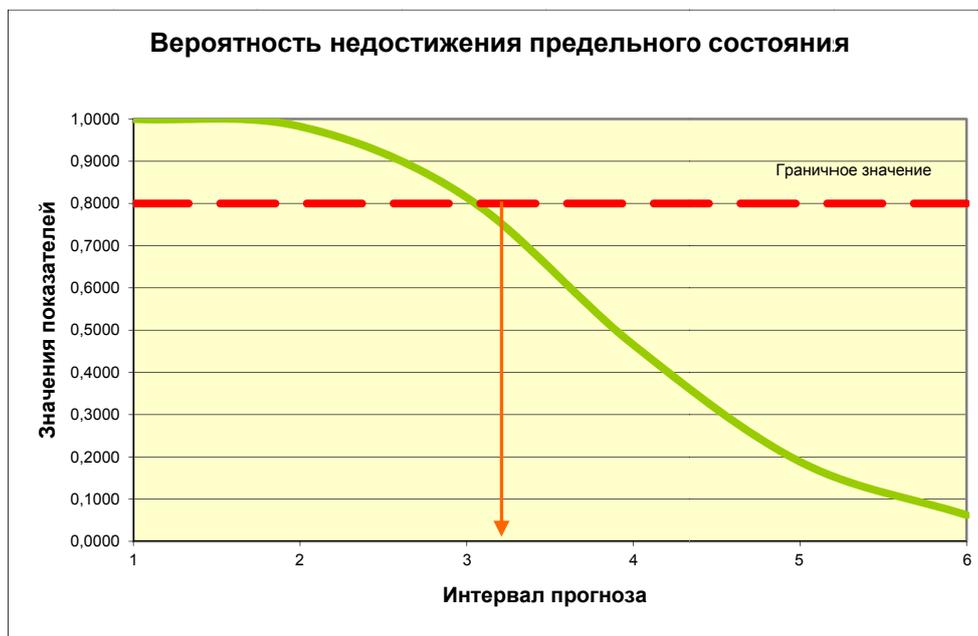


Рисунок 7. Определение величины остаточного ресурса ОИС

На графике рис. 7 представлена проекция нечеткой вероятности $\tilde{P}(t)$ недостижения ОИС своего предельного состояния при зафиксированном значении верхней ГПД. Абсцисса точки пересечения $\tilde{P}(t)$ и $\tilde{P}^{(sp)} = 0,8$ определяет оценку искомого показателя $\tilde{t}^{(OP)}$ фактического остаточного ресурса ОИС.

Выводы

На основе представленного материала можно сделать следующие выводы. Рассмотренный в статье подход к оцениванию остаточного ресурса ОИС при значительной степени износа позволяет более точно и полно учесть фактические возможности целевого применения объектов инженерных систем, имеющих большие сроки эксплуатации и высокую степень неопределенности состояния. Основной особенностью разработанной модели является ее комплексность при объединении статистической ретроспективной информации и знаний и опыта экспертов. Это позволяет расширить информационную базу принятия решения о необходимости проведения ремонта, модернизации или замены объекта инженерной системы здания для обеспечения устойчивости оказания коммунальных услуг населению.

Заключение

Анализ известных работ, посвященных оценке фактического состояния объектов инженерных систем зданий, показал, что в рассматриваемых методах и моделях не в полной мере учитывается неопределенность, обусловленная высокой степенью износа ОИС, что, в свою очередь, может привести к возможным колебаниям их границ поля допуска и неточному определению остаточного ресурса. Выходом из создавшегося положения является совершенствование оценки остаточного ресурса ОИС в направлении объединения статистической информации со знаниями и опытом экспертов, выраженными в терминах математического аппарата нечеткой логики.

В статье обоснована актуальность разработки моделей оценивания остаточного ресурса ОИС по их параметрам, доступным для наблюдения. С помощью предлагаемого подхода снижается уровень неопределенности при определении мер по совершенствованию инженерных систем зданий для обеспечения их требуемой долговечности. Данный подход может найти практическое применение в управляющих зданиями организациях, при планировании и обосновании мероприятий по поддержанию работоспособного состояния инженерных систем.

Литература

1. Кобилев А. Г., Кирнев А. Д., Рудой В. В. Муниципальное управление и социальное планирование в муниципальном хозяйстве. Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. 608 с.
2. ГОСТ Р 51617-2000. Жилищно-коммунальные услуги. Общие технические условия.
3. Рогонский В. А., Костриц А. И., Шеряков В. Ф. и др. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений. СПб.: ОАО Издательство «Стройиздат СПб», 2004. 272 с.
4. Поршнев В. Н., Привен Е. М., Битиев А. В. Принципы обеспечения надежности функционирования системы водоснабжения. // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. №7. Ч. 1. С. 40.
5. Merenkov A., Sennova E., Sumarokov S. Optimization of development of heat and water supply system // Sov. Techn. Rev., A, Energy. New York: Harwood Academic Publ. GmbH, 1994. Vol. 6.1. Part 4. Pp. 1-31.
6. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник // Под ред. В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. 338 с.
7. Положение об организации, проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания жилых зданий, объектов коммунального хозяйства и социально-культурного назначения. Приказ Госкомархитектуры Госстроя СССР №312 от 23.11.1988. С. 58-88.
8. Методические рекомендации по определению технического состояния систем коммунальной инфраструктуры. Рекомендательное письмо Министерства регионального развития Российской Федерации от 26 апреля 2012 г. № 9905-АП/14.
9. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
10. Уткин В. С., Уткин Л. В. Экспертный метод определения физического износа зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2000. №1. С. 48.
11. Соколов В. А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания // Инженерно-строительный журнал. 2010. №6. С. 48-57.
12. Liu K. F. R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2003. Vol. 18. Pp. 426-439.

13. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings // *Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications* (Eds.: H. Zimmermann H-J, Tslentis G., van Someren M., Dounias G.) Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2002. Pp. 401-412.
14. Солдатенко Т. Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе нечеткого анализа причин их появления // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. №7 (25). С. 52-61.
15. Панкевич О. Д., Штовба С. Д. Діагностування тріщин будівельних констркцій за допомогою нечітких баз знань. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. 108 с.
16. Алексеев М. И., Ермолин Ю. А. Вероятностные характеристики времени наработки между отказами восстанавливаемых объектов водопроводно-канализационного хозяйства // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2009. №5. С. 26.
17. Kim Y. W., Kim S. C. Cost analysis of information technology-assisted quality inspection using activity-based costing. *Construction Management & Economics*. 2011. Vol. 29. №2. Pp. 163-172.
18. Величкин В. З., Солдатенко Т. Н. Модель интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению состоянием строительных конструкций зданий // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. №3. С. 74-82.
19. Englund S., Sorensen J., Sorensen B. Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis. *ACJ Materials Journal*. 1999. Vol. 96. №2. Pp. 160-166.
20. Шаров В. В. Методика прогнозирования отказов электрооборудования в условиях эксплуатации // *Промышленная энергетика*. 2009. №4. С. 13-19.
21. Миронов А. Н. Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. МО РФ, 2000. 430 с.
22. Прикладные нечеткие системы. Пер. с япон. Асаи К., Ватада Д., Иван С. и др. Под ред. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. М.: Мир, 1993. 368 с.
23. Мачнев В. А. Прогнозирование остаточного ресурса по результатам вибрационного диагностирования // *Нива Поволжья*. 2012. №1. С. 83-87.
24. Солдатенко Т. Н. Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. №5. С. 60-66.
25. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.
26. Солдатенко Т. Н. Программа обслуживания комплекса жизнеобеспечения здания, оптимальная по нескольким критериям // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2011. №2 (120). С. 81-86.
27. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Учебник. 10-е изд., стереотип. М.: Высшая школа, 2006. 575 с.
28. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
29. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения.

**Тамара Николаевна Солдатенко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: soldatenko-tn@bk.ru*

© Солдатенко Т.Н., 2012

doi: 10.5862/MCE.32.10

Model of the residual resource of plumbing systems with high level of wear

T.N. Soldatenko,*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia,
+7(812)297-59-49; e-mail: soldatenko-tn@bk.ru*

Key words

plumbing systems; residual resource; accessory function; individual forecasting

Abstract

Known methods of defining the condition of plumbing systems with high level of wear do not fully take into consideration the uncertainty at the buildings and their networks operation. In these methods the value of objects residual resource is considered as a random value, and tolerance zone borders – as a determinate value. The urgency of the approach consists in the account of possibility of tolerance range limits fuzzy value.

The purpose of the work was increasing the efficiency of decision-making at justification of actions for ensuring durability of building plumbing systems. The purpose was reached by use of the tools of fuzzy sets in the joint analysis of retrospective, current and expert information on change of plumbing system object technical condition and variable limits of its tolerance range. It is offered to carry out the calculation of residual resource by means of fuzzy values of time and probability of crossing the tolerance range limits by the object parameter.

The computational testing of the proposed approach showed its effectiveness. On the basis of these results the conclusions about the area and conditions of application of the developed algorithms and model were drawn.

References

1. Kobilev A. G. *Munitsipalnoe upravlenie i sotsialnoe planirovanie v munitsipalnom khozyaystve* [Municipal governance and social planning in the municipal economy]. Rostov-na-Donu: Feniks, 2007. 608 p. (rus)
2. *Zhilishchno-kommunalnye uslugi. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Housing and communal services. General specifications]. GOST R 51617-2000. (rus)
3. Rogonskiy V. A. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost zdaniy i sooruzheniy* [The operational reliability of buildings and structures]. Saint-Petersburg: OAO Izdatelstvo «Stroyizdat SPb», 2004. –272 p. (rus)
4. Porshnev V. N., Priven E. M., Bitiev A. V. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2007. No. 7. Part. 1. Pp. 40. (rus)
5. Merenkov A., Sennova E., Sumarokov S. Optimization of development of heat and water supply system. *Sov. Techn. Rev., A, Energy*. New York: Harwood Academic Publ. GmbH, 1994. Vol. 6.1. Part 4. Pp.1-31.
6. *Ekspluatatsiya system vodosnabzheniya, kanalizatsii i gazosnabzheniya: Spravochnik* [Operation of water supply, sewerage and gas: A Handbook]. Leningrad: Stroyizdat, Leningr. otd-e, 1988. 338 p. (rus)
7. *Polozhenie ob organizatsii, provedenii rekonstruktsii, remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya zhilyh zdaniy, obektov kommunalnogo khozyaystva i sotsialno-kulturnogo naznacheniya* [Regulations on the organization, reconstruction, repair and maintenance of residential buildings, public utilities, social and cultural]. November, 1988. No. 312. Pp. 58-88. (rus)
8. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu tekhnicheskogo sostoyaniya system kommunalnoy infrastruktury* [Guidelines to determine the technical condition of utility infrastructure]. 26 April 2012. No. 9905-AP/14. (rus)
9. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [Buildings. Rules of the survey and monitoring of the technical state]. GOST R 53778-2010. (rus)
10. Utkin V. S., Utkin L. V. *Promyshlennoe i grazhdanskoye stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2000. No. 1. Pp. 48. (rus)
11. Sokolov.V. A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU* [Scientific and technical sheets SPSTU]. 2010. No. 6 (120). Pp. 81-86. (rus)
12. Liu K. F. R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2003. Vol. 18. Pp. 426-439.

13. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. *Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2002. Pp. 401-412.
14. Soldatenko T. N. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 7 (25). Pp. 52-61. (rus)
15. Pankevich O. D., Shtovba S. D. *Diagnostirovanie treshchin stroitelnykh konstruksiy s pomoshchyu necetkikh baz znaniy* [Diagnosing fractures building construction using fuzzy knowledge bases]. Monograph. Vynnitsia: Universum, 2005. 108 p.
16. Alekseev M. I., Ermolin U. A. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering]. 2009. No. 5. Pp. 26. (rus)
17. Kim Y. W., Kim S. C. Cost analysis of information technology-assisted quality inspection using activity-based costing. *Construction Management & Economics*. 2011. Vol. 29. No. 2. Pp. 163-172.
18. Velichkin V. Z., Soldatenko T. N. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. № 3 (29). Pp. 74-82. (rus)
19. Englund S., Sorensen J., Sorensen B. Evaluation of Repair and Maintenance Strategies for Concrete Coastal Bridges on a Probabilistic Basis. *ACJ Materials Journal*. 1999. Vol. 96. No. 2. Pp. 160-166.
20. Sharov V. V. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2009. No. 4. Pp. 13-19. (rus)
21. Mironov A. N. *Teoreticheskie osnovy i metody mnogomodelnogo prognozirovaniya dolgovechnosti slozhnykh voenno-tekhnicheskikh system kosmicheskogo naznacheniya* [Theoretical basis and methods of multi-model prediction of durability of complex military-technical systems for space purposes]. 2000. 430 p. (rus)
22. *Prikladnyye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy systems]. Translation from Japanese Asai K., Vatada D., Ivan S. and other. Edited by Terano T., Asai K., Sugeno M. Moscow: Mir, 1993. 368 p. (rus)
23. Machnev V. A. *Niva Povolzhya* [Niva Volga]. 2012. No. 1. Pp. 83-87. (rus)
24. Soldatenko T. N. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 5 (23). Pp. 60-66. (rus)
25. Alekseev A. A. *Identifikatsiya i diagnostika system* [Identification and diagnosis systems]. Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2009. 352 p. (rus)
26. Soldatenko T. N. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU* [Scientific and technical sheets SPSTU]. 2011. No. 2 (120). Pp. 81-86. (rus)
27. Venttsel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Theory of probability]. Textbook. 10th Edition. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 575 p. (rus)
28. Borisov A. N., Krumberg O. A., Fedorov I. P. *Prinyatie resheniya na osnove nechetkikh modeley: primery ispolzovaniya* [Decision making based on fuzzy models: Examples]. Riga: Zinatne, 1990. 184 p. (rus)
29. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Reliability engineering. Terms and definitions]. GOST 27.002-89.

Full text of this article in Russian: pp. 64-72