

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЛИКВИДАЦИЕЙ ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗАТОПЛЕНИЯ Г. АТКАРСКА

Хамутова М. В.¹, Кушников В. А.², Резчиков А. Ф.³

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г.Чернышевского, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д.83

²Институт проблем точной механики и управления РАН,
Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24

³Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65
mariuka7d@rambler.ru, iptmuran@san.ru,

Аннотация: Сформулирована постановка задачи управления процессом ликвидации последствий наводнения, решение которой позволит повысить качество и эффективность управления процессом ликвидации последствий наводнения в Аткарске. Для решения поставленной задачи разработана модель системной динамики, описывающая нелинейные процессы объекта управления и позволяющая определить значения характеристик последствий наводнения, влияющих на величину ущерба. Разработанное математического обеспечение может быть использовано в информационных системах управления МЧС объектового, местного и территориального уровня.

Ключевые слова: управление процессом ликвидации последствий наводнения, математическая модель, системная динамика.

Введение

Саратовская область подвержена наводнениям, связанным с весенним паводком. В период весеннего половодья, разливаясь, р. Аткара затапливает на продолжительное время значительную территорию г. Аткарска Саратовской области и в отдельные годы этот процесс принимает форму стихийного бедствия.

Для повышения эффективности управления ликвидацией последствий наводнения в г. Аткарске необходимо разработать математическое обеспечение, позволяющее минимизировать последствия наводнения.

1 Управления процессом ликвидации последствий наводнения

1.1 Постановка задачи

Для информационно-управляющих систем РСЧС объектового, местного и территориального уровня разработать формальные модели и алгоритмы, позволяющие на временном интервале $t \in [t_0; t_N]$ определить управляющие воздействия $\mathbf{p}^a(t) \in P$, минимизирующие целевую функцию:

$$(1) \quad Z(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}^a(t)) = \int_{t_0}^{t_N} \sum_{i=1}^n (X_i^* - X_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}^a(t)))^2 \mu_i dt, \text{ при ограничениях}$$

$$(2) \quad \frac{dX_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}^a(t))}{dt} = f(t, \mathbf{a}(t), X_1(t, \mathbf{p}^a(t)), \dots, X_n(t, \mathbf{p}^a(t))),$$

$$i = \overline{1, n}, X_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}^a(t)) > 0, i = \overline{1, n}, t > 0$$

и при граничных условиях

$$(3) \quad F_i^{t_0}(\mathbf{X}, \mathbf{X}', \mathbf{p}^a) = 0, F_j^{t_N}(\mathbf{X}, \mathbf{X}', \mathbf{p}^a) = 0, i = \overline{1, k_1}, j = \overline{1, k_2},$$

где X_i^* , $i = \overline{1, n}$ - рекомендованные экспертами значения характеристик последствий наводнения, $X_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}^a(t))$, $i = \overline{1, n}$ - значения характеристик последствий, выбираемые согласно нормативным документам [1]. μ_i , $i = \overline{1, n}$ - весовые коэффициенты характеристик, отражающий значимость, определенной характеристики в сравнении с другими. Управляющих воздействий $\mathbf{p}^a(t) \in P$ формируются в виде планов (комплексов) мероприятий, направленных на смягчение возможных последствий.

1.2 Метод решения задачи управления процессом ликвидации последствий наводнений на примере затопления Аткарска

Для наводнения в Аткарске были выбраны следующие характеристики последствий наводнений: $X_1(t)$ - численность группировки сил, участвующих в ликвидации последствий наводнений; $X_2(t)$ - количество промышленных и производственных объектов в зоне наводнения; $X_3(t)$ - количество транспортных средств, участвующих в ликвидации последствий наводнений на объектах и территориях; $X_4(t)$ - численность населения в зоне затопления; $X_5(t)$ - ущерб основным производственным фондам в зоне затопления; $X_6(t)$ - ущерб оборотным производственным фондам в зоне затопления; $X_7(t)$ - количество погибших сельскохозяйственных животных; $X_8(t)$ - количество мостов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения; $X_9(t)$ - количество жилых домов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения.

Задача (1) относится к задачам вариационного исчисления на условный экстремум. Для решения указанной задачи был использован аппарат системной динамики:

$$(4) \quad \frac{dX_i(t, \mathbf{a}(t), \mathbf{p}^a(t))}{dt} = f_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m) - f_i^-(F_1, F_2, \dots, F_m), i = \overline{1, n}$$

где f_i^+ , f_i^- , $i = \overline{1, n}$ - темпы, непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения системной переменной X_i , $i = \overline{1, n}$. F_j , $j = \overline{1, m}$ - факторы, влияющие на скорость изменения переменной X_i , которые при этом являются системными переменными или параметрами внешней среды [2].

Статистические данные по характеристикам для наводнения в Аткарске являются фрагментарными, поэтому для расчета характеристик последствий наводнений будем использовать модель, разработанную на основе экспертного опыта о характере зависимостей между системными переменными, процесс построения которой представлен в [3-8]. Таким образом, система дифференциальных уравнений, описывающая нелинейные процессы ликвидации последствий наводнений, примет вид:

$$(5) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = k_1^a \sqrt{S(t)X_4(t)} \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = k_2^a \sqrt{S(t)X_4(t)} \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = k_3^a X_1(t) \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = k_4^a D(t)S(t) \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = k_5^a \frac{CD(t)\varphi_1^a(F(t), G(t))X_2(t)}{S(t)RK_{\text{неодн}}} \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = k_6^a X_5(t) \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = k_7^a \frac{\varphi_2^a(F(t), G(t), T(t))S(t)X_4(t)}{X_1(t)X_3(t)} \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = k_8^a \varphi_3^a(F(t), G(t), t) \sqrt{S(t)X_4(t)} - k_9^a X_1(t)X_3(t) \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = k_{10}^a (\varphi_4^a(F(t), G(t), t))^3 \sqrt{S(t)X_8(t)} - k_{11}^a X_1(t)X_3(t). \end{array} \right.$$

Где $D(t)$ - плотность населения, $F(t)$, $G(t)$, $T(t)$ - средняя скорость течения, глубина и температура воды, соответственно, $S(t)$ - площадь зоны затопления, C - стоимость основных производственных фондов субъекта РФ, $K_{\text{неодн}}$ - коэффициент, определяющий степень готовности предприятий к наводнению, R - группировка сил, участвующих в мероприятиях по предупреждению наводнений, смягчению и ликвидации их последствий для предприятий. φ_1^a , φ_2^a , φ_3^a и φ_4^a - функции, которые определяются согласно таблицам из [9]. Поправочные коэффициенты k_i^a , $i = \overline{1,11}$ определяются посредством вычислительного эксперимента.

Система (5) имеет место при росте площади затопления, если площадь затопления постоянна или уменьшается, то актуальна система дифференциальных уравнений (6). Эти системы при начальных условиях $t_0 = 1$, $X_i(t_0) = X_{i0}$, $i = \overline{1,9}$ представляют собой задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Решение систем (5) и (6) получено методом Рунге-Кутты 4-го порядка при $X^N(t_0) = \{0,2 \ 0,166 \ 0,2 \ 0,033 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}$ - начальных значениях моделируемых переменных, нормированных относительно их максимальных значений.

$$(6) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dX_1(t)}{dt} = 0 \\ \frac{dX_2(t)}{dt} = 0 \\ \frac{dX_3(t)}{dt} = k_3^a X_1(t) \\ \frac{dX_4(t)}{dt} = 0 \\ \frac{dX_5(t)}{dt} = 0 \\ \frac{dX_6(t)}{dt} = k_6^a X_5(t) \\ \frac{dX_7(t)}{dt} = 0 \\ \frac{dX_8(t)}{dt} = -k_9^a X_1(t)X_3(t) \\ \frac{dX_9(t)}{dt} = -k_{11}^a X_1(t)X_3(t). \end{array} \right.$$

Полученные при решении результаты аппроксимируются полиномами:

$$\begin{aligned} X_1(t) &= -0,001t^3 + 0,021t^2 - 0,058t + 0,238, \\ X_2(t) &= -0,0001t^4 + 0,00165t^3 - 0,0047t^2 + 0,033t + 0,137, \\ X_3(t) &= -0,0001t^4 + 0,00245t^3 - 0,0117t^2 + 0,055t + 0,154, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X_4(t) &= -0,0001t^4 + 0,0011t^3 + 0,00136t^2 + 0,022t + 0,01, \\
X_5(t) &= -0,00007t^4 + 0,002t^3 - 0,0177t^2 + 0,102t - 0,0865, \\
X_6(t) &= 0,00001t^4 - 0,0004t^3 + 0,003t^2 - 0,0006t + 0,0024, \\
X_7(t) &= -0,00004t^4 + 0,0014t^3 - 0,008t^2 + 0,02t - 0,012, \\
X_8(t) &= 0,0000045t^4 + 0,00034t^3 - 0,0015t^2 + 0,0034t - 0,0022, \\
X_9(t) &= 0,000003t^4 + 0,00047t^3 - 0,0023t^2 + 0,005t - 0,0034.
\end{aligned}$$

Подставим полиномы, рекомендованные значения характеристик и весовые коэффициенты в (1), получим значение целевой функции согласно плану $p_0^a = const$:

$$\begin{aligned}
(7) \quad Z(p_0^a) &= \int_1^{12} (3,7 \times 10^{(-9)} t^8 - 1,38 \times 10^{(-7)} t^7 + 0,2 \times 10^{(-5)} t^6 - 0,2 \times 10^{(-4)} t^5 + \\
&+ 0,024 + 0,2 \times 10^{(-3)} t^4 - 0,97 \times 10^{(-3)} t^3 + 0,25 \times 10^{(-2)} t^2 - 0,6 \times 10^{(-2)} t) dt = 0,778
\end{aligned}$$

Для наводнения в Аткарске было сформировано множество планов мероприятий, мощность которого равна двум $P = \{p_1^a(t), p_2^a(t)\}$, где любой план мероприятий направлен на изменение значений характеристик $X_i(t)$, $p_j^a : \{X_1, X_2, \dots, X_9\} \rightarrow \{X_1 + \alpha_1^{(j)}, X_2 + \alpha_2^{(j)}, \dots, X_9 + \alpha_9^{(j)}\}$, $j = \overline{1, 2}$. Рассчитаем для каждого плана значение целевой функции Z , а затем выберем план $p^*(t)$ для которого $Z(t, \mathbf{a}(t), p^*(t)) = \min\{Z(t, \mathbf{a}(t), p_j^a)\}$ [10-12]. В таблице 1 представлены значения целевой функции согласно плану p_0^a и при реализации планов p_1^a и p_2^a .

Таблица 1. Значение целевой функции Z при реализации планов мероприятий p_0^a , p_1^a и p_2^a

	для плана мероприятий p_0^a	при реализации плана p_1^a	при реализации плана p_2^a
$Z(p_j^a(t))$	0,778	0,667	0,677

Из таблицы 1 следует, что реализация плана мероприятий p_1^a позволит повысить эффективность управления процессом ликвидации последствий наводнения в Аткарске.

Согласно результатам, полученным из модели, значение характеристики $X_9(t)$ будет составлять 119 домов. При реализации плана p_1^a это количество снизится до 75. Значение характеристики $X_8(t)$ составило 5 мостов, а при реализации плана p_1^a это количество снизится до 3 мостов. В целом, полученные результаты вполне согласуются с реальными данными наводнения в Аткарске в апреле 2018 года.

Заключение

Разработано математическое обеспечение для управления процессом ликвидации последствий наводнений, которое может быть использовано в автоматизированных информационно-управляющих системах объектового, местного и территориального уровня РСЧС, позволяющее повысить эффективность и качество процессов управления.

Литература

1. ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий (принят Постановлением Госстандарта РФ от 20.06.1995 N 308)
2. Садовничий В. А., Акаев А. А., Коротаев А. В., Малков С. Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики. М.: ИСПИ РАН, 2012. 360 с.
3. Резчиков А. Ф., Кушиников В. А., Иващенко В. А., Богомолов А. С., Филимонюк Л. Ю., Хамутова М. В. Моделирование последствий наводнений на основе причинно-следственных комплексов и системно-динамического подхода Форрестера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. 13 (4) с. 13-20
4. Хамутова М. В., Кушиников В. А. Математическая модель прогнозирования последствий наводнений // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. №3. с. 109-114
5. Резчиков А. Ф., Цвиркун А. Д., Хамутова М. В., Кушиников В. А., Иващенко В. А. Модели и алгоритмы информационных систем управления процессом ликвидации последствий наводнения на промышленных

- объектах и территориях // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018): материалы Одиннадцатой междунар. конфер. – Т. 1 – М.: ИПУ РАН, 2018. – с. 317-320
6. *Kushnikov V.A., Rezhikov A.F., Tsvirkun A.D.* Control in man-computer systems with computer-aided goal correction // *Automation and remote control*, 1998, vol. 59, no. 7. Part 2. P. 1040-1046
7. *Khamutova M. V. et al* Forecasting characteristics of flood effects // *Journal of Physics: Conf. Series* 1015 (2018) 052012 doi :10.1088/1742-6596/1015/5/052012
8. *Khamutova M., Rezhikov A., Kushnikov V., Ivaschenko V., Kushnikova E. and Samartsev A.* Mathematical Models and Algorithms for the Management of Liquidation Process of Floods Consequences // *Recent Research in Control Engineering and Decision Making*. 2019. Vol. 199. P. 540 – 541. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_44
9. РД 153-34.2-002-01. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения (приказ Минэнерго России № 130 от 26.04.2001 г.).
10. *Кушников В.А., Яндыбаева Н.В.* Управление образовательным процессом ВУЗа на основе модели Форрестера // *Вестник Саратовского технического университета*. 2011. Т. 2. №1(55). с. 172-176.
11. *Щербаков М.А., Кушников В.А.* Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла // *Вестник Саратовского технического университета*. 2011. Т. 2. №1(55). с. 196-200.
12. *Аветисян Ю.А., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Родичев В.А.* Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2009. № 11. с. 43-47.