

УДК 502.5

А. В. Бурмакова, В. В. Смелов

Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Деятельность любого эксперта в большинстве случаев можно свести к формулировке гипотез и оценкам их достоверности. При этом интерес представляют условия, при которых достоверность сформулированных гипотез возрастает или снижается.

Статья посвящена методу проверки гипотезы в условиях неопределенности с применением теории нечетких множеств в экспертной системе, предназначенной для поддержки принятия решений по выбору эффективных с точки зрения экологии технологий реабилитации геологической среды. Основой экспертной системы является модель прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов. Модель является комплексной и включает четыре уровня: поверхностный, почвенный, грунтовый и уровень грунтовых вод. Модель описывает процесс вертикального проникновения нефтепродукта и горизонтального распространения на поверхностном уровне (растекание), а также перемещение вместе с грунтовыми водами. В статье проверяется гипотеза о достижении нефтепродуктом грунта в условиях недостоверности исходных данных, а также вычисляется оценка достоверности полученного результата.

Ключевые слова: математическая модель, системы поддержки решений, проверка гипотезы, нечеткие вычисления, экология, нефтепродукты, экспертная система.

Для цитирования: Бурмакова А. В., Смелов В. В. Применение нечетких вычислений для проверки гипотез на основе модели прогнозирования процесса загрязнения геологической среды в результате аварийного пролива нефтепродуктов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 1 (242). С. 36–42.

A. V. Burmakova, V. V. Smelov

Belarusian State Technological University

**APPLICATION OF FUZZY CALCULATIONS
TO TEST HYPOTHESES BASED ON A MODEL FOR PREDICTING
THE PROCESS OF CONTAMINATION OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT
AS A RESULT OF AN EMERGENCY SPILL OF OIL PRODUCTS**

The activity of any expert, in most cases, can be reduced to the formulation of hypotheses and assessments of their reliability. In this case, the conditions under which the reliability of the formulated hypotheses increases or decreases are of interest.

The article is devoted to the method of hypothesis testing in conditions of uncertainty using the theory of fuzzy sets in an expert system designed to support decision-making on the choice of efficient, from the point of view of ecology, technologies for the rehabilitation of the geological environment. The expert system is based on a model for predicting the consequences of an emergency spill of oil products. The model is complex and includes four levels: surface, soil, groundwater and groundwater level. The model describes the process of vertical penetration of oil products and horizontal spread at the surface level (spreading) and movement with groundwater. The article tests the hypothesis that the oil product reaches the ground in conditions of unreliability of the initial data, and calculates the assessment of the reliability of the result.

Key words: mathematical model, decision support systems, hypothesis testing, fuzzy calculations, ecology, oil products, expert system.

For citation: Burmakova A. V., Smelov V. V. Application of fuzzy calculations to test hypotheses based on a model for predicting the process of contamination of the geological environment as a result of an emergency spill of oil products. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2021, no. 1 (242), pp. 36–42 (In Russian).

Введение. Применение экспертной системы, как правило, связано с необходимостью

принятия решения в условиях частичной неопределенности, которая обычно связана с плохим

качеством исходных данных. Другими словами, экспертная система выступает в роли механизма поддержки принятия решений.

В некоторых случаях задача поддержки решения может быть сформулирована в форме предположения (гипотезы), требующей ответа, подтверждающего или отрицающего это предположение. При этом важным является не только сам ответ, но и оценка качества полученного ответа.

В источнике [1] описана математическая модель прогнозирования (ММП) последствий аварийного пролива нефтепродуктов (НП), которая является основой экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной в результате аварийного пролива НП, и предназначена для поддержки принятия решений по формированию перечня мероприятий для реабилитации загрязненной геологической среды [2, 3].

Модель является комплексной и включает четыре уровня: поверхностный, почвенный, грунтовый и уровень грунтовых вод. Модель описывает процесс вертикального проникновения НП (через почву, грунт до грунтовых вод) и горизонтального распространения на поверхностном уровне (растекание), а также перемещение вместе с грунтовыми водами.

Исходными данными для ММП служат: тип НП (керосин, бензин, дизельное топливо, мазут), объем V_0 (m^3) пролитого НП, температура воздуха T ($^{\circ}C$), а также данные, характеризующие геологическую среду места пролива.

Пусть известны все исходные данные аварийного пролива НП. Рассмотрим гипотезу Ψ : **пролитый на поверхность НП достиг грунта.**

Для проверки сформулированной гипотезы будем использовать два первых уровня ММП: поверхностный и почвенный.

Поверхностный (первый) слой модели позволяет прогнозировать массу испарившегося НП, площадь и форму пятна загрязнения, а также определить массу НП, достигшую почвенного слоя.

Площадь пятна загрязнения S_1 (m^2) вычисляется по следующей формуле:

$$S_1 = V_0 \cdot d_1, \quad (1)$$

где V_0 – объем пролитого НП (m^3); d_1 – коэффициент растекания НП (m^1).

Коэффициент растекания нефтепродукта d_1 является справочной величиной и зависит от поверхности, на которой пролит НП, и от объема (V_0) пролитого НП [4].

Масса пролитого M_0 НП (кг) вычисляется по следующей формуле:

$$M_0 = V_0 \cdot \rho_0, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность пролитого НП (kg/m^3).

Для вычисления массы M_1 (кг) испарившегося нефтепродукта применяется следующая формула:

$$M_1 = S_1 \cdot q_1(T), \quad (3)$$

где $q_1(T)$ – удельная величина выбросов известного нефтепродукта (kg/m^2).

Значение $q_1(T)$ зависит от температуры T воздуха и является справочной величиной (kg/m^2) [5].

Для вычисления формы пятна загрязнения применяется эвристический алгоритм [6], исходными данными для которого являются географические координаты центра, площадь S_1 пролива, а также данные о рельефе поверхности в окрестности центра пролива, позволяющие вычислить углы наклона поверхности. Результатом расчета служит множество координат границы наземного пятна загрязнения.

Почвенный (второй) слой ММП позволяет рассчитать массу НП, адсорбированную почвой, и максимальную глубину проникновения НП в почву.

Адсорбированная почвой масса M_2 НП (кг) вычисляется по следующей формуле:

$$M_2 = S_1 \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0, \quad (4)$$

где h_2 – средняя высота (мощность) почвенного слоя (м); u_2 – нефтеемкость почвы.

Значением безразмерной величины нефтеемкости почвы u_2 является максимально возможная концентрация НП в почве. Нефтеемкость u_2 и средняя плотность НП ρ_0 являются справочными величинами [5, 7].

Условие подтверждения гипотезы Ψ может быть записано в форме следующего неравенства:

$$M_0 - M_1 - M_2 > 0. \quad (5)$$

Другими словами, если масса M_0 пролитого НП превышает совокупную массу M_1 испарившегося и M_2 адсорбированного НП, то гипотеза Ψ подтверждается.

Основная часть. Пусть объем пролитого нефтепродукта V_0 не является достоверно известной величиной. Введем для величины V_0 меру нечеткости [8, 9], заданную функцией принадлежности $\mu(v)$. При этом будем предполагать, что эта функция имеет треугольный вид (рис. 1).

Аналитически функция $\mu(v)$ может быть записана следующим образом:

$$\mu(v) = \begin{cases} \frac{v - V_L}{V_M - V_L}, & V_L \leq v < V_M, \\ \frac{V_R - v}{V_R - V_M}, & V_M \leq v < V_R. \end{cases} \quad (6)$$

Несложно заметить, что эксперт, описывающий неопределенность для объема V_0 пролитого НП, должен задать три значения V_L , V_M и V_R , характеризующие интервал и пиковое значение функции принадлежности.

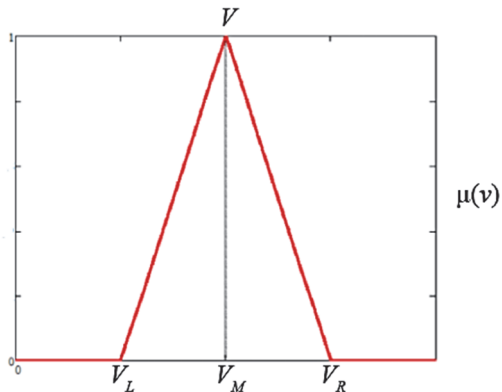


Рис. 1. Функция принадлежности для величины $\mu(v)$

Принимая во внимание формулы (1) и (2), функции принадлежности для площади пролива $\mu(s)$ и массы пролитого НП $\mu(m_0)$ примут следующий вид:

$$\mu(s) = \begin{cases} \frac{s - S_L}{S_M - S_L}, & S_L \leq s < S_M, \\ \frac{S_R - s}{S_R - S_M}, & S_M \leq s < S_R, \end{cases} \quad (7)$$

где $S_L = V_L \cdot d_1$; $S_M = V_M \cdot d_1$; $S_R = V_R \cdot d_1$.

$$\mu(m_0) = \begin{cases} \frac{m_0 - M_{0L}}{M_{0M} - M_{0L}}, & M_{0L} \leq m_0 < M_{0M}, \\ \frac{M_{0R} - m_0}{M_{0R} - M_{0M}}, & M_{0M} \leq m_0 < M_{0R}, \end{cases} \quad (8)$$

где $M_{0L} = V_L \cdot \rho_0$; $M_{0M} = V_M \cdot \rho_0$; $M_{0R} = V_R \cdot \rho_0$.

Вид графиков этих функций представлен на рис. 2 и 3.

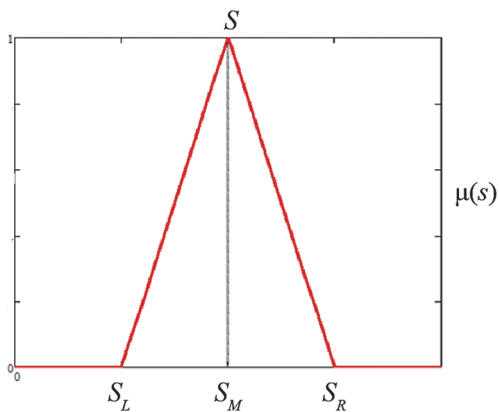


Рис. 2. Функция принадлежности для величины $\mu(s)$ – площади пролива НП

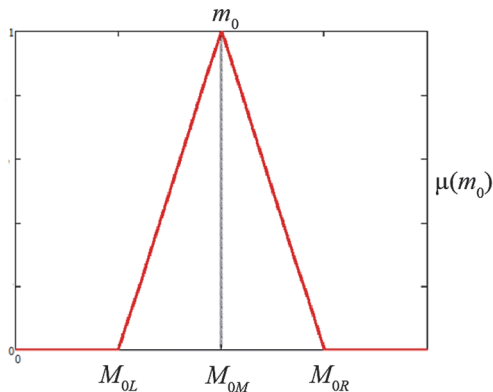


Рис. 3. Функция принадлежности для $\mu(m_0)$ – массы пролитого НП

При расчете массы испарившегося нефтепродукта M_1 используется удельная величина выбросов нефтепродукта q , которая зависит от температуры окружающей среды. Будем считать далее, что эта величина не является достоверно известной и эксперт (как свое предположение) задает ее значение в форме трапециевидной функции принадлежности $\mu(q)$ (рис. 4).

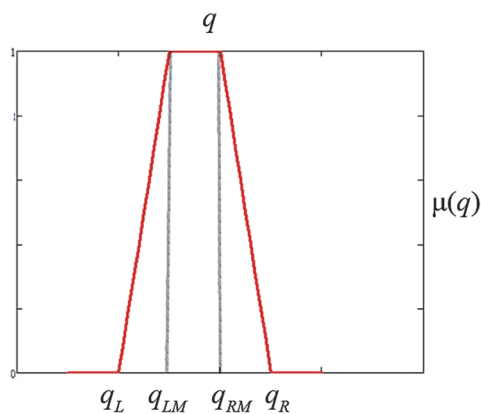


Рис. 4. Функция принадлежности для $\mu(q)$ удельной величины выбросов НП

Нечеткая удельная величина выбросов нефтепродукта q может быть задана экспертом с помощью четырех значений: q_L , q_{LM} , q_{RM} и q_R . При этом аналитическое выражение для функции $\mu(q)$ будет выглядеть следующим образом:

$$\mu(q) = \begin{cases} \frac{q - q_L}{q_{LM} - q_L}, & q_L \leq q < q_{LM}, \\ 1, & q_{LM} \leq q < q_{RM}, \\ \frac{q_{RM} - q}{q_R - q_{RM}}, & q_{RM} \leq q < q_R. \end{cases} \quad (9)$$

Принимая во внимание формулы (3), (7) и [10], функция принадлежности $\mu(m_1)$ для массы испарившегося НП принимает следующий вид:

$$\mu(m_1) = \begin{cases} \frac{\sqrt{m_1} - \sqrt{M_{1L}}}{\sqrt{M_{1LM}} - \sqrt{M_{1L}}}, & M_{1L} \leq m_1 < M_{1LM}, \\ 1, & M_{1LM} \leq m_1 < M_{1RM}, \\ \frac{\sqrt{M_{1LM}} - \sqrt{m_1}}{\sqrt{M_{1R}} - \sqrt{M_{1RM}}}, & M_{1RM} \leq m_1 < M_{1R}, \end{cases} \quad (10)$$

где $M_{1L} = S_L \cdot q_L$; $M_{1LM} = S_L \cdot q_{LM}$; $M_{1RM} = S_M \cdot q_{RM}$; $M_{1R} = S_R \cdot q_R$.

График функции принадлежности для m_1 представлен на рис. 5.

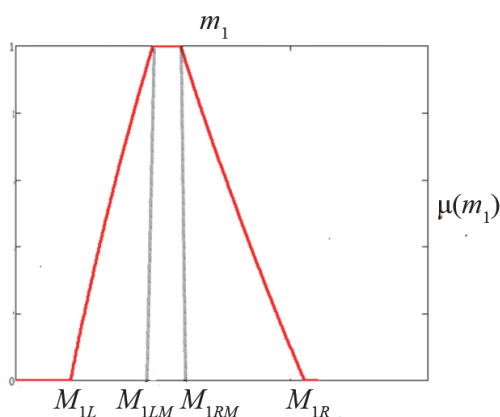


Рис. 5. Функция принадлежности для $\mu(m_1)$

Принимая во внимание формулу (4), функция принадлежности адсорбированного продукта НП в почве примет следующий вид:

$$\mu(m_2) = \begin{cases} \frac{m_2 - M_{2L}}{M_M - M_{2L}}, & M_{2L} \leq m_2 < M_{2M}, \\ \frac{M_{2R} - m_2}{M_{2R} - M_{2M}}, & M_{2M} \leq m_2 < M_{2R}, \end{cases} \quad (11)$$

где $M_{2L} = S_L \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0$; $M_{2M} = S_M \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0$; $M_{2R} = S_R \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0$.

В соответствии с формулой (5) для проверки гипотезы Ψ необходимо исследовать нечеткую величину:

$$m_0 - m_1 - m_2, \quad (12)$$

где m_0 – нечеткая величина с функцией принадлежности (8); m_1 – нечеткая величина с функцией принадлежности (10); m_2 – нечеткая величина с функцией принадлежности (11).

Аналитическое выражения функции принадлежности нечеткой величины (12) можно получить, последовательно выполнив два вычитания $m = (m_0 - m_1) - m_2$, используя промежуточное значение $m' = (m_0 - m_1)$:

$$\mu(m') = \begin{cases} \frac{m' - (M_{0L} - M_{1R})}{(M_{0M} - M_{1RM}) - (M_{0L} - M_{1R})}, & M_{0L} - M_{1R} \leq m' < M_{0M} - M_{1RM}, \\ 1, & M_{0M} - M_{1RM} \leq m' < M_{0M} - M_{1LM}, \\ \frac{(M_{0R} - M_{1L}) - m'}{(M_{0R} - M_{1L}) - (M_{0M} - M_{1LM})}, & M_{0R} - M_{1LM} \leq m' < M_{0R} - M_{1L}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu(m) = \begin{cases} \frac{m - (M_L - M_{2R})}{(M_{LM} - M_{2M}) - (M_L - M_{2R})}, & M_L - M_{2R} \leq m < M_{LM} - M_{2M}, \\ 1, & M_{LM} - M_{2M} \leq m < M_{RM} - M_{2M}, \\ \frac{(M_R - M_{2L}) - m}{(M_R - M_{2L}) - (M_{RM} - M_{2M})}, & M_{RM} - M_{2M} \leq m < M_R - M_{2L}, \end{cases} \quad (14)$$

где $M_L = M_{0L} - M_{1R}$; $M_{LM} = M_{0M} - M_{1RM}$; $M_{RM} = M_{0M} - M_{1LM}$; $M_R = M_{0R} - M_{1L}$.

Как следует из формулы (14), функция принадлежности нечеткой величины $m = m_0 - m_1 - m_2$ в общем случае будет иметь трапециевидную форму. При этом возможны три варианта ее расположения относительно оси ординат (рис. 6, а, б, в).

Функция принадлежности, изображенная на рис. 6, а, соответствует тому, что гипотеза Ψ не подтвердилась, так как мера положительного значения величины $m_0 - m_1 - m_2$ является нулевой. Рис. 6, в отражает противоположный случай, когда нулевой является мера отрицательного значения $m_0 - m_1 - m_2$, что соответствует подтверждению гипотезы Ψ . Вариант функции принадлежности (рис. 6, б) описывает случай, при котором ненулевое значение меры есть для положительных и отрицательных значений величины $m_0 - m_1 - m_2$. В этом случае для меры достоверности гипотезы предлагается использовать значение, которое вычисляется как отношение площадей $\delta = \int_0^{m_R} \mu(m) dm$ (рис. 6, б) под

графиком $\mu(m)$ справа от оси ординат, ко всей площади $\Delta = \int_{m_L}^{m_R} \mu(m) dm$. В этом случае функция меры достоверности гипотезы Ψ принимает следующий вид:

$$\mu_\Psi = \begin{cases} 0, & m_R \leq 0, \\ \frac{\delta}{\Delta}, & m_L < 0, m_R > 0, \\ 1, & m_L \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

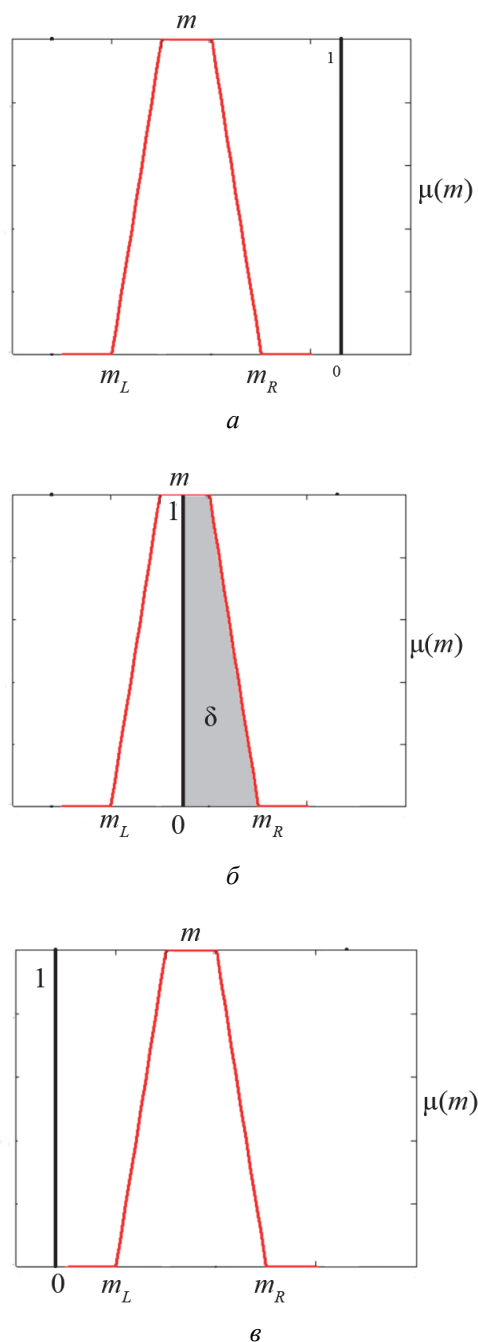


Рис. 6. Расположение графика:
 а – слева от оси ординат; б – по обе стороны
 оси ординат; в – справа от оси ординат

В качестве примера, демонстрирующего применение предлагаемого метода, рассмотрим проверку гипотезы Ψ при аварийном проливе НП со следующими характеристиками (таблица).

Исходные данные пролива НП

Исходные данные	
Нефтепродукт	Бензин
Объем пролитого нефтепродукта	Примерно 15 м ³
Температура воздуха	Примерно 10–15°C

Окончание таблицы

Описание геологической среды	
Мощность почвенного слоя	0,2 м
Справочные значения	
Плотность НП	750 кг/м ³
Удельная величина выбросов НП	1,7–4,0 кг/м ²
Нефтеемкость почвы	0,21
Значения, заданные экспертом	
Объем пролитого нефтепродукта	$V_L = 10 \text{ м}^3$ $V_M = 15 \text{ м}^3$ $V_R = 20 \text{ м}^3$
Удельная величина выбросов НП	$q_L = 1,7 \text{ кг/м}^2$ $q_{LM} = 2,5 \text{ кг/м}^2$ $q_{RM} = 3,7 \text{ кг/м}^2$ $q_R = 4,0 \text{ кг/м}^2$

Вычисления в соответствии с формулами (6)–(14) позволяют построить график (рис. 7), который отражает изменение меры нечеткости (достоверности) гипотезы Ψ в зависимости от величины объема пролитого НП.

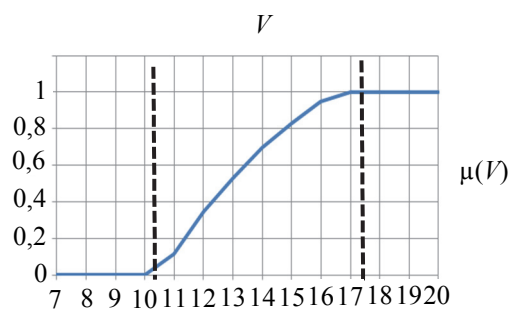


Рис. 7. Зависимость меры достоверности гипотезы Ψ от объема пролитого НП

Полученный график позволяет сделать следующие заключения:

1. При объеме пролитого НП, не превышающего 10 м³, гипотеза Ψ не подтверждается: загрязнение не достигает грунтового слоя.
2. При объеме пролитого НП в диапазоне от 11 до 16 м³ мера достоверности гипотезы Ψ изменяется от 0 до 1: степень проникновения загрязнения грунтового слоя растет от незначительного до максимально возможного при заданных условиях.
3. При объеме пролива НП, превышающем 17 м³, гипотеза Ψ подтверждается: загрязнение достигает грунтового слоя и является максимально возможным при заданных условиях.

Заключение. Таким образом, в статье предлагается метод проверки гипотез о достижении НП определенных слоев геологической среды, построенный на алгебраических операциях над

нечеткими величинами. Применение нечеткости входных переменных позволяет учесть погрешность измерения объема пролитого НП и дискретность значений в справочнике удельных величин выброса НП. Путем интерпретации выходной нечеткой величины в результате такого прогнозирования определяется мера достоверности заданной гипотезы.

С помощью представленной нечеткой модели были выполнены проверочные расчеты для гипотезы о достижении НП грунтового слоя геологической среды. Расчеты показали, что объемы НП до 10 м^3 не способны проникнуть сквозь почвенный слой, гипотезы о достижении объемами от 11 до 16 м^3 имеют меру вероятности больше 0, но меньше 1, а начиная с объема 17 м^3 , НП всегда достигает грунтового слоя.

Список литературы

1. Бурмакова А. В., Смелов В. В., Захаров А. А. Реализация комплексной математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов. Труды БГТУ. 2018. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. № 1(206). С. 82–87.
2. Оношко М. П., Абсаметов М. К., Смелов В. В. Разработка Экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на этапе опытно-конструкторских работ: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Минералогия Казахстана». Алматы, 2017. С. 143–145.
3. Смелов В. В., Блинова Е. А. Экспертная система прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов: материалы V Междунар. водного форума «Водные ресурсы и климат»: в 2 ч. Минск, 2017. Ч. 1. С. 196–198.
4. Методика расчета минимальной оснащенности аварийно-спасательных служб (формирований), предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации: прил. 1 к Проекту приказа МЧС Российской Федерации. М. С. 4–5, 39.
5. Белькова С. В. Определение ущерба окружающей среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Омск, ОмГТУ 2010. С. 14–18.
6. Бурмакова А. В., Смелов В. В., Буснюк Н. Н. Эвристический алгоритм вычисления формы пятна загрязнения поверхности земли нефтепродуктами // Труды БГТУ. 2018. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. № 1(206). С. 125–127.
7. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. С. 262.
8. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 167 с.
9. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. С. 33–40.
10. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. С. 32–34.

References

1. Burmakova A. V., Smelov V. V., Zakharov A. A. Rehabilitation of the complex mathematical model of predicting the consequences of an emergency spill of oil products. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 1 (206), pp. 82–87 (In Russian).
2. Onoshko M. P., Absametov M. K., Smelov V. V. [Development of an expert system for the rehabilitation of the geological environment contaminated with oil products, at the stage of development work]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. ("Minerageniya Kazakhstana")* [Materials of the International Scientific and Practical Conference ("Minerageny of Kazakhstan")]. Almaty, 2017, pp. 143–145 (In Russian).
3. Smelov V. V., Blinova E. A. Expert system for predicting the consequences of emergency spillage of petroleum products. *Materialy V Mezhdunar. vodnogo foruma ("Vodnyye resursy i klimat")* [Materials of the V International Water Forum ("Water Resources and Climate")]. Minsk, 2017, part 1, pp. 196–198 (In Russian).
4. *Metodika rascheta minimal'noy osnashchennosti avariyno-spatatel'nykh sluzhzb (formirovaniy), prednaznachennykh dlya lokalizatsii i likvidatsii razlivov nefi i nefteproduktov na territorii Rossiyskoy Federatsii, na kontinental'nom shel'fe i v isklyuchitel'noy ekonomicheskoy zone Rossiyskoy Federatsii. pril. 1 k Proyektu prikaza MChS Rossiyskoy Federatsii* [Methodology for calculating the minimum equipment of rescue services (formations) intended for localization and liquidation of oil and oil products spills in the Russian Federation, on the continental shelf and in the exclusive economic zone of the Russian Federation: Appendix 1 to the Draft Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation]. Moscow, pp. 4–5, 39 (In Russian).

5. Bel'kova S. V. *Opredeleniye ushcherba okruzhayshchey srede pri avariyaх na magistral'nykh nefteprovodakh* [Definition of damage to the environment during accidents on main oil pipelines]. Omsk, OmGTU Publ., 2010, pp. 14–18.
6. Burmakova A. V., Smelov V. V., Busnyuk N. N. Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 1 (206), pp. 125–127 (In Russian).
7. Goldberg V. M., Gazda S. *Gydrogeologicheskkiye osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984. P. 262.
8. Zade L. *Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k ponyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976. P. 167.
9. Leonenkov A. V. *Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg, BKhV-Petersburg Publ., 2005, pp. 33–40.
10. Borisov A. N., Krumberg O. A., Fedorov I. P. *Prinyatiye resheniy na osnove nechetkikh modeley: primery ispol'zovaniya* [Decision-making based on fuzzy models: Examples of use]. Riga, Zinatne Publ., 1990, pp. 32–34.

Информация об авторах

Бурмакова Анастасия Владимировна – аспирант кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: burmakova@belstu.by

Смелов Владимир Владиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: smw@belstu.by

Information about the authors

Burmakova Anastasia Vladimirovna – Phd student, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University. (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: burmakova@belstu.by

Smelov Vladimir Vladislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smw@belstu.by

Поступила после доработки 08.02.2021