

УДК 502.3

А. В. Бурмакова, Ж. М. Ибрагим, В. В. Смелов
Белорусский государственный технологический университет

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК В КОМПЛЕКСНОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ
АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Статья посвящена расширению комплексной математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов. Модель является основой экспертной системы, предназначенной для поддержки принятия решений по выбору эффективных с точки зрения экологии, технологий реабилитации геологической среды, описывает процесс загрязнения нефтепродуктами поверхностного слоя, почвы, грунта, а также распространение загрязнения с грунтовыми водами. С ее помощью можно прогнозировать форму и границы наземного пятна загрязнения, значения концентраций нефтепродуктов в почве и в грунте, а также концентрацию нефтепродуктов в грунтовых водах, границы наземного пятна, вертикальную и горизонтальную скорости проникновения и распространения загрязнения. В качестве входных используются данные о географических координатах пролива, тип и объем пролитого нефтепродукта, справочные данные о физико-химических свойствах нефтепродуктов, почвы и грунта.

Расширенная модель позволит использовать основную модель прогнозирования в условиях неполноты исходных данных, применив экспертные оценки.

Ключевые слова: математическая модель, прогнозирование, экология, нефтепродукты, экспертная система.

A. V. Burmakova, J. M. Ibrahim, V. V. Smelov
Belarusian State Technological University

**APPLICATION OF EXPERT ASSESSMENTS IN INTEGRATED
MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE CONSEQUENCES
OF THE EMERGENCY EXPLOSION OF OIL PRODUCTS**

The article is devoted to the expansion of the complex mathematical forecasting model of consequences of emergency spillage of oil products. The model is the basis of an expert system for supporting decision-making on the choice of optimal and efficient, in terms of ecology, rehabilitation technologies of geological environment, describes the process of over-contamination of a surface layer, the soil, the soil, by oil products as well as the dissemination of contamination with groundwater. It can be used to predict properties of oil concentrations in soil as well as the concentration of oil in groundwater, boundaries of a ground stain, vertical and horizontal penetration rate and the spread of contamination. The geographical coordinates of the strait, the type and amount of oil spilled, reference data on physical and chemical properties of mineral oil, ground and soil are used as input data.

The extended model will allow to apply the main forecasting model in the conditions of incompleteness of the initial data, using expert estimates.

Key words: mathematical model, forecasting, ecology, oil products, expert system.

Введение. Математическая модель прогнозирования (ММП) последствий аварийного пролива нефтепродуктов (НП) описана в публикации [1]. ММП 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 4 уровня: поверхностный, почвенный, грунтовый и уровень грунтовых вод.

Поверхностный слой модели позволяет прогнозировать массу испарившегося НП, площадь

и форму пятна загрязнения, а также определить массу НП, достигшую почвенного слоя.

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

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

где V_0 – объем пролитого НП (м^3); d_1 – коэффициент растекания НП (м^{-1}).

Коэффициент растекания нефтепродукта d_1 является справочной величиной и зависит от типа и объема нефтепродукта, типа почвы, а также угла наклона поверхности [4].

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

$$M_1 = S_1 \cdot q_1(T), \quad (2)$$

где $q_1(T)$ – удельная величина выбросов нефтепродукта (кг/м²).

Значение $q_1(T)$ зависит от температуры T воздуха и является справочной величиной (кг/м²) [5].

После испарения НП оставшийся объем проникает в почву и далее в грунт, может достигать грунтовых вод.

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 точках окрестности центра пролива, позволяющие вычислить углы α наклона поверхности. Результатом расчета является множество координат (x, y) границы наземного пятна загрязнения.

Почвенный слой ММП позволяет прогнозировать адсорбированную почвой массу НП и максимальную глубину их проникновения в почву.

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

$$M_2 = S_1 \cdot h_2 \cdot u_2 \cdot \rho_0, \quad (3)$$

где h_2 – средняя высота почвенного слоя (м); u_2 – нефтеемкость почвы; ρ_0 – средняя плотность НП (кг/м³).

Значение u_2 – нефтеемкость почвы, является максимальной возможной концентрацией НП в почве. Нефтеемкость u_2 и средняя плотность НП ρ_0 являются справочными величинами [5, 7].

Максимальная глубина проникновения H_2 НП в почву (м) вычисляется следующим образом:

$$H_2 = h_3 \cdot \frac{M_0 - M_1}{M_2}, \quad (4)$$

где M_0 – масса пролитого НП (кг).

Если НП не был адсорбирован полностью в почвенном слое, то оставшийся объем проникает в грунтовый слой.

Грунтовый слой модели позволяет прогнозировать адсорбированную грунтом массу НП и максимальную глубину проникновения НП в грунт.

Адсорбированная грунтовым слоем масса M_3 НП (кг) рассчитывается по формуле

$$M_3 = h_3 \cdot S_1 \cdot \rho_v \cdot m_3 \cdot w_3 \cdot \frac{\delta_0}{\delta_v}, \quad (5)$$

где h_3 – мощность слоя грунта; ρ_v – плотность воды (кг/м³); m_3 – пористость грунта (от 0 до 1); w_3 – капиллярная влагоемкость грунта (от 0 до 1); δ_0 – коэффициент поверхностного натяжения

НП (кг/с²); δ_v – коэффициент поверхностного натяжения воды (кг/с²).

Плотность воды ρ_v [8], коэффициент поверхностного натяжения НП δ_0 , коэффициент поверхностного натяжения воды δ_v [9], пористость грунта m_3 и капиллярная влагоемкость грунта w_3 [10] являются справочными величинами.

Максимальная глубина проникновения H_3 НП в грунт (м) зависит от адсорбированной в грунте массы:

$$H_3 = \begin{cases} h_3 \cdot \frac{M_0 - (M_1 + M_2)}{M_3}; \\ M_0 - (M_1 + M_2) \leq M_3; \\ h_3, M_0 - (M_1 + M_2) > M_3. \end{cases} \quad (6)$$

Данная статья посвящена расширению ММП для применения экспертных знаний, которые основаны на опыте специалистов из области экологии.

Основная часть. Как правило, знания экспертов (экспертизы) могут быть описаны в такой форме: «При проливе 30 м³ бензина на песчаный грунт ровной поверхности проникновение НП составило 2,5 м», или, например, «При проливе 50 м³ бензина на песчаный грунт, угол поверхности которого 3°, проникновение НП в почву составило 0,2 м». В некоторых случаях могут быть неизвестными тип грунта, угол наклона поверхности, конкретная марка НП и т. п.

Одну экспертизу можно представить в виде вектора:

$$\langle \text{Тип НП, Тип Гр, } V_0, S_1, \alpha, H_2, H_3 \rangle. \quad (7)$$

В общем случае n экспертиз могут быть заданы в форме матрицы.

$$\begin{bmatrix} \text{Тип НП}^1 & \text{Тип Гр}^1 & V_0^1 & S_1^1 & \alpha^1 & H_2^1 & H_3^1 \\ \text{Тип НП}^2 & \text{Тип Гр}^2 & V_0^2 & S_1^2 & \alpha^2 & H_2^2 & H_3^2 \\ \text{Тип НП}^3 & \text{Тип Гр}^3 & V_0^3 & S_1^3 & \alpha^3 & H_2^3 & H_3^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Тип НП}^n & \text{Тип Гр}^n & V_0^n & S_1^n & \alpha^n & H_2^n & H_3^n \end{bmatrix} \quad (8)$$

В том случае, если тип НП, тип грунта, объем пролитого НП и т. д. неизвестны, считаем их значения равными *undefined*.

Например, в первой экспертизе следующей матрицы неизвестен тип нефтепродукта, во второй – объем пролитого НП, в третьей – площадь НП, а в последней неизвестными являются тип и объем пролитого НП (формула (9)). В простейшем случае в экспертизе неизвестен только один компонент. Тогда экспертизы могут выглядеть следующим образом (формула (10)).

$$\begin{bmatrix} \text{Тип Гр}^1 & V_0^1 & S_1^1 & \alpha^1 & H_2^1 & H_3^1 \\ \text{Тип НП}^2 & \text{Тип Гр}^2 & \text{Тип Гр}^3 & V_0^3 & \alpha^3 & H_2^3 & H_3^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Тип Гр}^n & \text{Тип Гр}^n & \text{Тип Гр}^n & S_1^n & \alpha^n & H_2^n & H_3^n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &\langle \text{Тип НП}, \text{Тип Гр}, V_0, \text{Тип Гр}, \alpha, H_2, H_3 \rangle \\ &\langle \text{Тип НП}, \text{Тип Гр}, \text{Тип Гр}, S_1, \alpha, H_2, H_3 \rangle \\ &\langle \text{Тип НП}, \text{Тип Гр}, V_0, S_1, \alpha, \text{Тип Гр}, H_3 \rangle \\ &\langle \text{Тип НП}, \text{Тип Гр}, V_0, S_1, \alpha, H_2, \text{Тип Гр} \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

В этих случаях S_1, V_0, H_2, H_3 могут быть вычислены по формулам (1), (5) и (7).

Если неизвестен тип НП, но известно, что НП достиг грунта, экспертиза принимает следующий вид:

$$\langle \text{Тип Гр}, V_0, S_1, \alpha, H_2, H_3 \rangle. \quad (11)$$

Из формулы (6) можно выразить значение поверхностного натяжения НП:

$$\delta_0 = \frac{M_3 \cdot \delta_b}{h_3 \cdot S_1 \cdot m_3 \cdot w_3 \cdot \rho_b}, \quad (12)$$

и определение типа НП сведется к поиску экстремума:

$$|\delta_0 - \delta_0^i| \rightarrow \min, i = 1, \dots, k, \quad (13)$$

где δ_0^i – справочные значения поверхностного натяжения нефтепродуктов. Определив δ_0^i , минимизируя разность $|\delta_0 - \delta_0^i|$ в соответствии со справочником [9], можно выяснить тип НП.

Если известно, что НП полностью адсорбировался в почве и не попал в грунт, то из формулы (4) можно выразить его плотность:

$$\rho_0 = \frac{M_2}{h_2 \cdot S_1 \cdot u_2}, \quad (14)$$

и определение типа НП сведется к поиску экстремума:

$$|\rho_0 - \rho_0^i| \rightarrow \min, i = 1, \dots, k, \quad (15)$$

где ρ_0^i – справочные значения плотности нефтепродуктов. Определив ρ_0^i , минимизируя разность $|\rho_0 - \rho_0^i|$ в соответствии со справочником [6], можно выяснить тип НП.

Если неизвестен тип грунта, то экспертиза имеет вид

$$\langle \text{Тип НП}, \text{Тип Гр}, V_0, S_1, \alpha, H_2, H_3 \rangle. \quad (16)$$

Тогда в соответствии с формулой (6) может быть выражена величина, характеризующая тип

грунта: произведение пористости грунта m_3 на его капиллярную влагоемкость w_3 :

$$m_3 \cdot w_3 = \frac{M_3}{h_3 \cdot S_1 \cdot \rho_b \cdot \frac{\delta_0}{\delta_b}}. \quad (17)$$

Определение типа грунта в этом случае сведется к поиску экстремума в выражении

$$|m_3 \cdot w_3 - m_0^i \cdot w_0^i| \rightarrow \min, i = 1, \dots, k, \quad (18)$$

где m_0^i и w_0^i – справочные значения пористости и капиллярной влагоемкости грунта. Определив m_0^i и w_0^i , минимизируя разность $|m_3 \cdot w_3 - m_0^i \cdot w_0^i|$ в соответствии со справочником [10], можно выяснить тип грунта.

Если неизвестен угол α наклона поверхности, экспертиза принимает вид

$$\langle \text{Тип НП}, \text{Тип Гр}, V_0, S_1, \text{Тип Гр}, H_2, H_3 \rangle. \quad (19)$$

Из формулы (1) выражается значение коэффициента растекания НП, характеризующее значение угла наклона поверхности [4].

Если неизвестна площадь пролива и тип НП, экспертиза принимает вид

$$\langle \text{Тип Гр}, V_0, \text{Тип Гр}, \alpha, H_2, H_3 \rangle. \quad (20)$$

Формула (1) позволяет найти площадь пролитого НП, и если при этом известно, что НП достиг грунта, то определение типа НП может быть осуществлено по формулам (13), (14). В том случае, если НП полностью адсорбировался в почве, то определение типа НП сводится к примеру, описанному выше (формулы (15), (16)).

Если одновременно неизвестны площадь пролитого НП и тип грунта, экспертиза имеет следующий вид:

$$\langle \text{Тип Гр}, \text{Тип Гр}, V_0, S_0, \alpha, H_2, H_3 \rangle. \quad (21)$$

В этом случае вычисление неизвестных величин сводится к применению формул (1) и (17).

При неизвестных площади пролитого НП и глубине проникновения НП в грунт экспертиза принимает вид

$$\langle \text{Тип НП, Тип Гр, } V_0, \text{undefined}, \alpha, H_2, \text{undefined} \rangle. \quad (22)$$

Для этого случая вычисление неизвестных величин сводится к применению формул (1) и (5)–(7).

Заключение. В условиях реальной эксплуатации экспертной системы прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродук-

тов [1] может оказаться, что некоторые исходные данные для расчета отсутствуют, но при этом пользователь владеет некоторыми экспертными знаниями, которыми можно дополнить исходные данные, вычислить неизвестные значения и осуществить необходимый прогноз.

Описанная в статье расширенная ММП решает эту задачу. Очевидно, что в этом случае полученные прогнозируемые значения в формулах (13), (15), (18) будут обладать другим качеством, оценка которого является отдельной задачей, для решения которой целесообразно применять аппарат нечетких вычислений [11].

Литература

1. Бурмакова А. В., Смелов В. В., Захаров А. А. Реализация комплексной математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 1 (206). С. 82–87.
2. Разработка экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на этапе опытно-конструкторских работ / Оношко М. П. [и др.] // Минералогия Казахстана: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Алматы, 21–22 сент. 2017 / Ин-т геол. наук. Алматы, 2017. С. 143–145.
3. Смелов В. В., Блинова Е. А. Экспертная система прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов // Водные ресурсы и климат: материалы V Междунар. водного форума, Минск, 5–6 окт. 2017 г. В 2-х ч. Ч. 1 / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2017. С. 196–198.
4. Методика расчета минимальной оснащенности аварийно-спасательных служб (формирования), предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации. Приложение 1 к Проекту приказа МЧС Российской Федерации // МЧС России: сайт. М., 2011. URL: http://mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/KsIgABroCa.doc (дата обращения: 03.04.2018).
5. Определение ущерба окружающей среде при авариях на магистральных нефтепроводах. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 43 с.
6. Бурмакова А. В., Смелов В. В., Буснюк Н. Н. Эвристический алгоритм вычисления формы пятна загрязнения поверхности земли нефтепродуктами // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 1 (206). С. 125–127.
7. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
8. Методика прогнозирования объема экологического загрязнения грунтов и грунтовых вод при проливе экологически вредных веществ / А. В. Вагнер [и др.] // Экологический вестник России. 2004. № 5. С. 45–51.
9. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н. С. Огняник [и др.]. Киев: АПН, 2006. 278 с.
10. Экологическая гидрогеология: учеб. для вузов / А. П. Белоусова [и др.]. М.: Академкнига, 2006. 397 с.
11. Конышева Л. К., Назаров Д. М. Основы теории нечетких множеств. СПб.: Питер, 2011. 192 с.

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., Shagarova L. V., Cherepanskiy M. M., Tomina N. M., Zakharov A. A. Development of an expert system for the rehabilitation of the geological environment contaminated with oil products, at the stage of development work. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "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 Mezhdunarodnogo vodnogo foruma "Vodnye resursy i klimat"* [Materials of the V International Water Forum "Water Resources and Climate"], Minsk, 2017, pp. 196–198 (In Russian).

4. *Metodika rascheta minimal'noy osnashchennosti avariyno-spasatel'nykh sluzhb (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. Prilozhenie 1 k Proektu 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 territory of 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] (In Russian). Available at: http://mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/KslgABroCa.doc (accessed 03.04.2018).
5. *Opredelenie ushcherba okruzhayushchey srede pri avariyaх na magistral'nykh nefteprovodakh* [Definition of damage to the environment during accidents on main oil pipelines]. Omsk, OmSTU Publ., 2010. 43 p.
6. Burmakova A. V., Smelov V. V., Busnyuk N. N. Heuristic algorithm for calculating the shape of the spot of pollution of the earth's surface by oil products. *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. *Gidrogeologicheskie osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 262 p.
8. Vagner A. V., Bukharin S. K., Kochemasov S. G., Priymak V. M. A technique for predicting the volume of environmental contamination of soils and groundwater in the strait of environmentally hazardous substances. *Ekologicheskiy vestnik Rossii* [Ecological Bulletin of Russia], 2004, no. 5, pp. 45–51 (In Russian).
9. Ognyanik N. S., Paramonova N. K., Briks A. L., Pashkovskiy I. S., Konnov D. V. *Osnovy izucheniya zagryazneniya geologicheskoy sredy legkimi nefteproduktami* [Fundamentals of studying the pollution of the geological environment with light oil products]. Kiev: APN Publ., 2006. 278 p.
10. Belousova A. P., Gavich I. K., Lisenkov A. B., Popov E. V. *Ekologicheskaya gidrogeologiya: uchebnyk dlya vuzov* [Ecological hydrogeology: a textbook for high schools]. Moscow: Akademkniga Publ., 2006. 397 p.
11. Konyshcheva L. K., Nazarov D. M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of the theory of fuzzy sets]. Saint-Petersburg: Peter, 2011. 192 p.

Информация об авторах

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

Ибрагим Жад Мишель – аспирант кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Ibrahimjad29@gmail.com

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 – Master's degree 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

Ibrahim Jad Mishel – PhD student, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ibrahimjad29@gmail.com

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 15.05.2018