УДК 502.5

**А. В. Бурмакова1, В. В. Смелов1, А. А. Захаров2**

1 Белорусский государственный технологический университет

2 Институт природопользования национальной академии наук Беларуси

**РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Статья посвящена описанию математической модели прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов. Модель является основой экологической экспертной системы и носит комплексный характер. Разделена на уровни, соответствующим слоям геологической среды: поверхностный, почвенный, грунтовый, грунтовые воды. Модель позволяет рассчитывать значения концентраций нефтепродуктов в почве и в грунте под наземным пятном загрязнения, а также концентрацию нефтепродуктов в грунтовых водах, горизонтальную скорость распространения загрязнения за границы наземного пятна. Модель также позволяет рассчитывать площадь и форму наземного пятна, вертикальную и горизонтальную скорости проникновения и распространения загрязнения, учитывает испарение и адсорбцию нефтепродуктов в почве и грунте. В качестве входных данных используются данные о географических координатах пролива (долгота, широта), тип и объем пролитого нефтепродукта, справочные данные о физико-химических свойствах нефтепродуктов, почвы и грунта.

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

**А. V. Burmakova1, V. V. Smelov1, A. A. Zaharov2**

1 Belarusian State Technological University

2 The Institute of Nature Management of the National Academy Sciences of Belarus

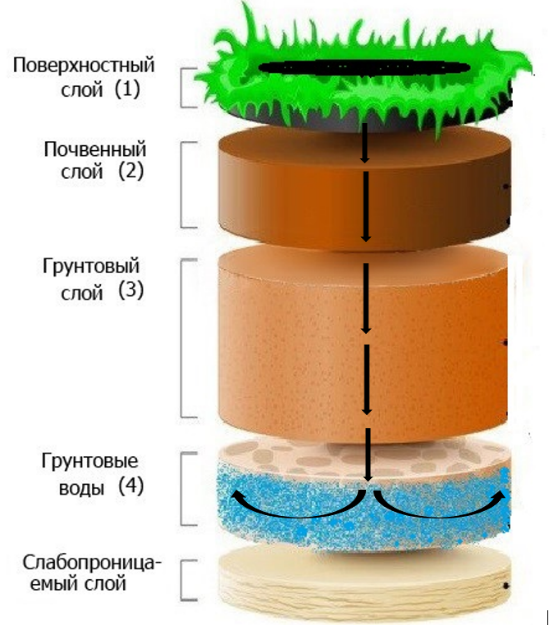
**IMPLEMENTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE CONSEQUENCES OF THE EMERGENCY EXERCISE OF OIL PRODUCTS**

The article is devoted to the description of the mathematical model of forecasting the consequences of the accidental spillage of oil products. The mathematical model is the basis of the ecological expert system. The model is complex, including the forecasting of the consequences of spillage of oil products on different layers of the geological environment: surface, soil, ground, ground water. The model allows to predict the values of oil product concentrations in soil and ground under pollution spots, and also to predict the concentration of oil products in groundwater, the horizontal speed of pollution spreading beyond the borders of the ground spot. In this case, the model calculates the area and shape of the ground spot, the vertical and horizontal rates of penetration and spread of pollution, takes into account evaporation and adsorption of oil products in soil and soil. For the forecasting, the model uses data on the geographic coordinates of the strait, the type and volume of spilled oil, reference data are used on the physicochemical properties of oil products, soil and ground, and cartographic data are used.

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

**Введение.** Математическая модель прогнозирования последствий аварийного пролива нефтепродуктов является основой экспертной системы, которая предназначена для поддержки принятия решений по выбору оптимальных с точки зрения экологической и экономической эффективности технологий реабилитации геологической среды.

По результатам расчетов «Институтом природопользования Национальной академии наук Беларуси» за 2003-2015 года, выяснилось, что загрязнение нефтепродуктами земель в пределах населенных пунктов Республики Беларусь является наиболее распространенным по сравнению с загрязнениями другого характера. Это доказывает актуальность изучаемой проблемы.

Математическая модель содержит формулы вычисления для прогноза различных аварийных ситуаций. Существует множество математических моделей, которые позволяют рассчитать последствия загрязнения водных объектов, загрязнения атмосферы в результате испарения нефтепродуктов, отдельных частей геологической среды и другие. Уникальностью данной модели является то, что она содержит формулы и методы решений не только отдельного слоя геологической среды, а включает в себя поверхностный слои, грунтовый и почвенный слой, а также рассчитывает последствия аварии в грунтовых водах и распространения загрязнения с ними.

**Основная часть.** Исходными для математической модели прогнозирования (ММП) являются следующие данные.

1. Географические координаты центра пролива, объем и тип (бензин, керосин, сырая нефть и пр.) пролитого нефтепродукта (НП).

2. Данные о физико-химических свойствах нефтепродуктов.

3. Данные о свойствах грунтов.

4. Картографическая информация: рельеф местности, глубина залегания грунтовых вод, мощность грунтового и почвенного слоя, коэффициенты задержки НП грунте и почве.

Исходные данные можно представить в виде векторов, где: вектор X – данные местности пролива, вектор D – данные о нефтепродукте, вектор G ­ данные о грунте.



ММП позволяет прогнозировать: площадь и форму наземного пятна загрязнения, массу испарение НП с поверхностного слоя, глубину и скорость проникновения НП в почву и грунт, адсорбированную массу НП в почве и грунте, максимальную концентрацию НП в почве и грунте, максимальную концентрацию нефтепродуктов в грунтовых водах, временной интервал для достижения максимальной концентрации в грунтовых водах, скорость распространения фронта загрязнения с потоком грунтовых.вод.

ММП является многоуровневой. На рисунке 1 отображены четыре уровня ММП (нумеруются сверху вниз от 1 до 4).

В таблице 1 перечислены уровни, значения и справочные данные применяемые для вычислений на каждом уровне ММП.

*Поверхностный слой.*На первом уровне модели вычисляются следующие значения: масса испарения НП, площадь пятна загрязнения и форма пятна загрязнения.

*Площадь S1 пятна загрязнения*вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (1) |

Коэффициент растекания нефтепродукта *d*1 является справочной величиной и зависит от типа и объема нефтепродукта, типа почвы, а также угла наклона поверхности [1].

*Масса M1 испарившегося нефтепродукта* вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2) |

Значение *q*1*(T)*зависит от температуры*T* воздуха и является справочной величиной (кг/м2) [2].

Для вычисления *формы пятна загрязнения*применяется эвристический алгоритм, исходными данными для которого являются географические координаты центра, площадь *S1* пролива, а также картографические данные о рельефе поверхности в окрестности центра. Результатом расчета является множество пар (*x*,*y*) координат границ пятна загрязнения. Высоты в точках вычисляются методом аппроксимации.

*Толщина наземного слоя пролитого нефтепродукта H*1находится по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (3) |

*Почвенный слой.*На втором уровне модели вычисляются: адсорбированная почвой масса НП, максимально возможная концентрация НП в почве и максимальная глубина проникновения НП в почву.

Рисунок 1 – Слои модели прогнозирования последствий пролива нефтепродуктов

Таблица 1 – Значения, вычисляемые в ММП

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Уровни модели | Величины | | |
| Обозначение | Ед. измерения | Наименование |
| 0. | Исходные данные | *V*0 | (м3) | объем пролитого НП |
| ρ0 | (кг/м3) | плотность НП |
| *M*0 | (кг) | масса пролитого НП |
| δ0 | (кг/с2) | коэффициент поверхностного натяжения НП |
| 1. | Поверхностный слой | *S*1 | (м2) | площадь пятна загрязнения |
| *d*1 | (м-1) | коэффициент растекания НП |
| *M*1 | (кг) | масса испарившегося нефтепродукта |
| *q*1*(T)* | (кг/м2) | удельная величина выбросов нефтепродукта |
| *H*1 | (м) | толщина наземного слоя пролитого нефтепродукта |
| 2. | Почвенный слой | *M*2 | (кг) | адсорбированная почвой масса НП |
| *h*2 | (м) | средняя высота почвенного слоя |
| *u*2 | - | нефтеемкость почвы |
| *H2* | (м) | максимальная глубина проникновения НП в почву |
| 3. | Грунтовый слой | *v*3 | (м/с) | скорость вертикального проникновения НП в грунт |
| *k*в | (м/с) | коэффициент фильтрации воды |
| *r3* | - | коэффициент задержки НП в грунте |
| *M*3 | (кг) | адсорбированная грунтовым слоем масса НП |
| *h*3 | (м) | мощность слоя грунта |
| *m*3 | - | пористость грунта, (от 0 до 1) |
| *w*3 | - | капиллярная влагоёмкость грунта (от 0 до 1) |
| ρB | (кг/м3) | плотность воды |
| δB | (кг/с2) | коэффициент поверхностного натяжения воды |
| *H*3 | (м) | максимальная глубина проникновения НП в грунт |
| *C*3 | - | максимальная концентрация НП в грунте |
| ρ3 | (кг/м3) | средняя плотность грунта |
| 4. | Грунтовые воды | *t*4 | (с) | временной интервал для достижения максимальной концентрации в грунтовых водах |
| *l*4 | (м) | максимальное расстояние распространения фронта загрязнения от центра пролива НП с грунтовыми водами |
| *v*4 | (м/с) | горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами |
| *h*4 | (м) | толщина водоносного слоя, принимается за 1 м. |
| *h'*3 | (м) | мощность грунтового слоя в первой точке |
| *h''*3 | (м) | мощность грунтового слоя во второй точке |
| *C*4 | - | концентрация загрязнения в грунтовых водах |

*Адсорбированная почвой масса M*2 *НП*вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (4) |

Значение *u*2– нефтеемкость почвы, является *максимальной возможной концентрацией* НП в почве.

Нефтеемкость *u*2является справочной величиной [2], также как и средняя плотность НП ρ0 [3].

*Максимальная глубина проникновения H*2 *НП в почву*вычисляется следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (5) |

*Грунтовый слой.*На третьем уровне модели вычисляются: скорость вертикального проникновения НП в грунт, адсорбированная грунтом масса НП, максимальная глубина проникновения НП в грунт, максимальная концентрация НП в грунте.

*Скорость вертикального проникновения v3 НП в грунт*вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (6) |

Коэффициент фильтрации воды *k*в [4] и коэффициент задержки *r*3 НП [5] в грунте являются справочными величинами.

*Адсорбированная грунтовым слоем масса M*3 *НП* рассчитывается по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (7) |

Плотность воды ρB [6], коэффициент поверхностного натяжения НП δ0, коэффициент поверхностного натяжения воды δB [7], пористость грунта *m*3 и капиллярная влагоёмкость грунта w3 [8] являются справочными величинами.

*Максимальная глубина проникновения H3 НП в грунт* зависит от адсорбированной в грунте массы ивычисляется следующим образом, следовательно, концентрация высчитывается используя формулу, или же, приравнивается к мощности грунтового слоя. Вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

*Максимальная концентрация НП C3 в грунте*зависит от адсорбированной в грунте массы, следовательно, концентрация высчитывается используя максимальную глубину проникновения НП в грунт, или же, заменяя ее на мощность грунтового слоя. Вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Средняя плотность грунта ρ3 является справочной величиной [9].

*Уровень грунтовых вод.*На четвертом уровне модели вычисляются: срок достижения максимальной концентрации на границе грунтовых вод, горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами, концентрация НП в грунтовых водах, радиус распространения НП с грунтовыми водами.

*Временной интервал для максимальной концентрации на уровне грунтовых вод t4 вычисляется как сумма продолжительности времени полного впитывания НП в почву и времени полного впитывания НП в грунт:*

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

*Максимальное расстояние распространения фронта загрязнения от центра пролива НП с грунтовыми водами* вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (11) |

где*R* – радиус пятна пролива (м).

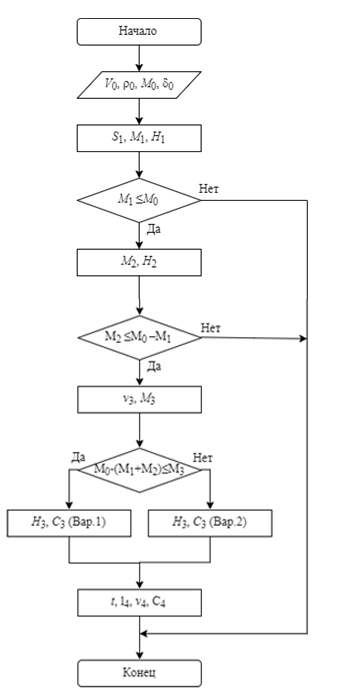
*Горизонтальная скорость распространения фронта загрязнения с грунтовыми водами*вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (12) |

*Концентрация загрязнения в грунтовых водах C4*вычисляется по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (13) |

ММП работает по алгоритму, схема которого представлена на рисунке 2.

Для оценки адекватности модели проведены испытания на пяти объектах в Беларуси. В качестве объектов были выбраны нефтебазы и автозаправочные станции, на которых были зафиксированы аварийные проливы НП и проведены исследования по замеру концентраций Институтом природопользования. Предварительный анализ полученного с помощью ММП прогноза и результатов измерений показал, что при значительных расхождениях прогнозируемых и измеренных концентраций НП в отдельных точках, в целом прогноз ММП не противоречит общей реальной картине загрязнения. Аналогичные исследования в настоящее время проводятся на двух объектах (нефтепроводы) в Казахстане.

**Заключение.** Работа выполнена в рамках совместного белорусско-казахстанского инновационного проекта «Разработка экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации для территорий государств-участников СНГ» Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств-участников на период до 2020 г.

Математическая модель является совместной разработкой специалистов Научно-производственного центра по геологии, Института природопользования национальной академии наук Беларуси и Белорусского государственного технологического университета.

Рисунок 2 – Алгоритм работы ММП

**Литература**

1. 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, Приложение 1 к Проекту приказа МЧС Российской Федерации. – С. 4-5, 39.
2. Белькова, С. В. Определение ущерба окружающей среде при авариях на магистральных нефтепроводах / С. В. Белькова // Омск: ОмГТУ, 2010. – С.14-18.
3. Гольдберг, В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / В. М. Гольберг, С. Газда // М.: Недра, 1984. – С. 262.
4. Михалева, Т. А. Отчёт о комплексной геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической съемке масштаба 1:50 000 для целей мелиорации в водосборах рек Илия и Гайна (Плещеницкий участок) / Т. А. Михалева – 1978-1980. – Отчет 921.
5. Методика прогнозирования миграции загрязняющих веществ в грунтовых водоносных горизонтах от автозаправочных станций, руководящий документ Республики Беларусь РД РБ 0212.1-98. – Минск, 1998.
6. Вагнер, А. В. Методика прогнозирования объема экологического загрязнения грунтов и грунтовых вод при проливе экологически вредных веществ / А. В. Вагнер, С. К. Бухарин, С. Г. Кочемасов и др. // ИСБ: Экологический вестник России. – № 5. – 2004. – С. 45-51.
7. Огнянник, Н. С. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н. С. Огняник, Н. К. Парамонова, А. Л. Брикс и др. – К.: [А.П.Н.], 2006. – С. 278: ил. – Тит. л., аннот. парал. Англ.
8. Белоусова, А. П / Экологическая гидрогеология: учебник для вузов / И. К. Гавич, А. Б. Лисенков, Е. В. Попов // М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – С. 397.
9. Шляппо, Е. С. / Отчёт о комплексной геолого-гидрогеологической съёмке масштаба 1:50000 с инженерно-геологическими исследованиями по водосборам низовьев рек Горыни, Ствиги и Уборти (Средне-Припятский участок) / Е. С. Шляппо, Е. К. Щурок – 1968-1970. – отчет 20.

**References**

1. 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.– P. 39.
2. Definition of damage to the environment during accidents on main oil pipelines / S. V. Belkova – ed. OmSTU, Omsk, 2010 – P.14-18.
3. Goldberg V. M., Gazda S. Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution. – Moscow: Nedra, 1984. – P. 262.
4. Report on the integrated geological-hydrogeological and scale of 1:50 000 for the purpose of land reclamation in watersheds of the rivers Ilia and Gaina (Pleschenitsky site) / Т. А. Mikhaleva 1978-1980 – report 921.
5. Methodology for predicting the migration of pollutants in groundwater aquifers from gasoline stations, Guideline Document of the Republic of Belarus RB 0212.1-98, Minsk, 1998.
6. Wagner A. V., Bukharin S. K., Kochemasov S. G., etc. A technique for predicting the volume of environmental contamination of soils and groundwater in the strait of environmentally hazardous substances. ISB: Ecological Herald of Russia. 2004. № 5. – P. 45-51.
7. Fundamentals of studying the pollution of the geological environment with light oil products / N. S. Ognianik, N. K. Paramonova, A. L. Briks, etc. – K.: [APN], 2006. – P. 278: ill. – Titus. l., annot. paral. Engl.
8. Belousova A. P., Gavich I. K., Lisenkov A. B., Popov E. V. Ecological hydrogeology: A textbook for high schools. – Moscow: Academic Library, 2006. – P. 397.
9. Report on a comprehensive geological and hydrogeological survey of a scale of 1: 50000 sengineering-geological studies on catchments of the lower reaches of the Goryni, Stvigi and Uborti rivers (Middle Pripyatsky site) / E. S. Shlyappo, E. K. Shchurok 1968-1970 – Report 20.

**Информация об авторах**

**Бурмакова Анастасия Владимировна –** магистранткафедры информационных систем и технологий Белорусского государственного технологического университета. (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: burmakova@belstu.by

**Смелов Владимир Владиславович –** доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Белорусского государственного технологического университета. (220006, г. Минск, ул. Свердлова 13а, Республика Беларусь). E-mail: [smw@belstu.by](mailto:smw@belstu.by)

**Захаров Алексей Александрович** – младший научный сотрудник Института природопользования национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, проспект Независимости 66, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

**Information about the authors**

**Burmakova Anastasia Vladimirovna –** undergraduate. Belarusian State Technological University. (13a, Sverdlova street, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: burmakova@belstu.by

**Smelov Vladimir Vladislavovich –** ph. D. (Engineering), Assistant Professor, head of department of information systems and technologies. Belarusian State Technological University. (13a, Sverdlova street, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smw@belstu.by

**Zakharov Aleksei Alekseevich –** junior research fellow The Institute of Nature Management of the National Academy Sciences of Belarus. (66, Independence Avenue, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.