

Нейронечеткая сеть для подбора асфальтобетонных смесей дорожных покрытий по содержанию воздушных пустот

В.В. Побединский^{1a}, С.И. Булдаков^{1b}, С.В. Ляхов^{1,2c}, И.А. Карабутова^{1d}, Е.С. Анастас^{1e}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, Россия

^a pobed@e1.ru, ^b buldakovsi@m.usfeu.ru, ^c lyahovsv@m.usfeu.ru, ^d karabutova.ia@yandex.ru, ^e elenasergevna@bk.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5433-4696>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-4514-7121>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-0802-909X>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0250-9789>

Статья поступила 21.01.2022, принята 11.02.2022

Рассмотрена проблема повышения качества и сокращения сроков разработки и проектирования асфальтобетонных смесей для дорожных покрытий автомобильных дорог общего пользования, а также лесных дорог. Отмечается, что существующие методы являются недостаточно оперативными и корректными в случаях, когда исходные или промежуточные расчетные данные несут свойство неопределенностей различного вида. Проблема особенно актуальна в настоящее время, после введения новых ГОСТов, в которых определена большая номенклатура смесей по своим составам. В этих условиях задача прогнозирования свойств асфальтобетонных смесей традиционными методами становится трудоемкой, длительной и недостаточно точной процедурой. Для решения проблемы необходимы новые, более совершенные методы проектирования основных параметров асфальтобетонных смесей, в которых используются современные достижения информационных технологий. Важным параметром при проектировании смеси является определение степени уплотнения дорожного покрытия, которое напрямую определяется содержанием воздушных пустот в смеси, что и составило основу настоящей работы. Целью работы было создание интеллектуальной системы для определения содержания воздушных пустот в уплотненной асфальтобетонной смеси дорожного покрытия. Решались следующие задачи: 1) проектирование основного параметра асфальтобетонных смесей дорожных покрытий; 2) обоснование входных и выходной переменных; 3) подготовка исходных данных для обучающих выборок; 4) разработка нейронной сети для определения воздушных пустот асфальтобетонной смеси; 5) программная реализация интеллектуальной системы в среде Matlab. Результатом исследований стала разработанная нейронечеткая сеть для подбора асфальтобетонной смеси с определением содержания воздушных пустот и ее программная реализация в среде Matlab. Практическое применение результатов предусматривает подбор асфальтобетонных смесей для дорожных покрытий.

Ключевые слова: дорожное покрытие; интеллектуальная система; асфальтобетонная смесь; содержание воздушных пустот; нейронечеткая сеть ANFIS.

Neuro fuzzy network for selection of asphalt concrete mixtures by air void content

V.V. Pobedinsky^{1a}, S.I. Buldakov^{1b}, S.V. Lyakhov^{1,2c}, I.A. Karabutova^{1d}, E.S. Anastas^{1e}

¹ Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

² Ural Federal University named after B.N. Yeltsin; 19, Mira St., Ekaterinburg, Russia

^a pobed@e1.ru, ^b buldakovsi@m.usfeu.ru, ^c lyahovsv@m.usfeu.ru, ^d karabutova.ia@yandex.ru, ^e elenasergevna@bk.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5433-4696>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-4514-7121>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-0802-909X>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-0250-9789>

Received 21.01.2022, accepted 11.02.2022

The problem of improving the quality and shortening the development and design of asphalt concrete mixtures for surfaces of public roads, as well as forest ones is considered. It is noted that the existing methods are not sufficiently operational and correct in cases where the original or intermediate settlement data is carried by the property of the uncertainties of various types. The problem is especially urgent at the present time after the introduction of new GOSTs, which define a large range of mixtures in terms of their compositions. Under these conditions, using traditional methods, the task of predicting the properties of asphalt concrete mixtures becomes a laborious, time-consuming procedure and insufficiently accurate. To solve the problem, new, more advanced methods of designing the main parameters of asphalt concrete mixtures are needed, which use modern advances in information technology. An important parameter in the design of the mixture is to determine the degree of compaction of the road surface, which is directly determined by the content of air voids in the mixture, which was the purpose of this work. The aim of the work is to create an intelligent system for determining the content of air voids in the compacted asphalt concrete mixture of the road surface. To achieve the goal, the following tasks are solved: 1) implementation of the formulation of the task of designing the main parameter of asphalt concrete mixtures of road surfaces; 2) justification of the input and output variables of the problem; 3) preparation of initial data for training samples; 4) development of a neural network for determining the air voids of the asphalt concrete mixture; 5) software implementation of an intelligent system in the

Matlab environment. The result of the research is the developed neural fuzzy network for the selection of asphalt concrete mixture with the determination of the content of air voids and its software implementation in the Matlab environment. Practical application of the results is provided for the selection of asphalt concrete mixtures for road surfaces.

Keywords: road surface; intelligent system; asphalt concrete mix; content of air voids; neural network ANFIS.

Введение. Лесные дороги являются важной составляющей как транспортной, так и лесопромышленной инфраструктуры, поэтому проблема прогнозирования работоспособности и долговечности дорожных покрытий лесных дорог, а также участков автомобильных дорог общего пользования, эксплуатируемых в тяжелых условиях, является одной из сложнейших в дорожном строительстве. Уровень транспортно-эксплуатационного состояния дорожной сети напрямую зависит от качества автомобильных и дорожных покрытий, поэтому важной задачей становится совершенствование технологии устройства асфальтобетонных покрытий дорог при обеспечении необходимых физических параметров и эксплуатационных показателей.

Введение новых государственных стандартов на асфальтобетоны и щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси привело к увеличению номенклатуры асфальтобетонных смесей [1]. В связи с тем, что объемы дорожного строительства стремительно растут, повышаются требования к дорогам, и для эффективного подбора смесей с целью повышения качества покрытия необходимо использовать новые методы, позволяющие оперативно и достаточно точно оценивать физические и эксплуатационные показатели любого асфальтобетонного покрытия.

Традиционное решение подобных задач заключается в создании упрощенной модели технологического процесса или объекта. Процесс устройства асфальтобетонного слоя включает такие основные процедуры, как проектирование, изготовление смеси, транспортировка материала, подготовка основания, укладка слоя и его уплотнение. Как видим, задача прогнозирования эксплуатационных свойств покрытий должна учитывать все указанные процедуры, что чрезвычайно сложно из-за большого количества параметров, при этом, как правило, взаимовлияющих друг на друга.

В этих условиях задача прогнозирования свойств асфальтобетонных смесей традиционными методами становится трудоемкой, длительной и недостаточно точной процедурой. Для решения проблемы необходимы новые, более совершенные методы проектирования основных параметров асфальтобетонных смесей, в которых используются современные достижения информационных технологий.

В результате прогресса в области математики и информационных технологий появились принципиально новые методы формализации неопределенностей в данных, что привело к развитию интеллектуальных систем, работающих с такими данными. Большой прогресс в этих задачах достигнут во многих областях, однако в проектировании дорог этого недостаточно, что является препятствием для своевременного выполнения проектов государственной важности, совершенствования методов проектирования и устройства дорог.

Важным параметром при проектировании смеси является определение степени уплотнения дорожного покрытия, которое напрямую определяется содержанием воздушных пустот в уплотненной смеси, что и составило цель настоящей работы.

Цель настоящей работы заключается в создании интеллектуальной системы для определения содержания воздушных пустот в уплотненной асфальтобетонной смеси дорожного покрытия.

Задачи настоящих исследований включают:

1 Разработку интеллектуальной системы для определения содержания воздушных пустот, включая решение следующих вопросов:

1.1 Постановка задачи проектирования асфальтобетонных смесей в содержательном виде.

1.2 Обоснование входных и выходных переменных для интеллектуальной системы.

2.2 Обоснование типа интеллектуальной системы.

2.3 Разработка обучающих выборок для настройки нейросети.

2.4 Программная реализация нейронной сети в среде *Matlab*.

2.5 Обучение нейронной сети и проверка адекватности на тестовых примерах.

Методы и средства исследований. В работе использована теория проектирования дорожных покрытий [2], интеллектуальных систем [3], нейронных сетей [4; 5]. Для реализации нейросети использована методика создания гибридных нейронечетких сетей типа *ANFIS (Adaptive Network Neuron Fuzzy Interference)* и *Toolbox* (инструмент) *anfisedit* системы *MATLAB* [6]. Обработка данных и формирование обучающих наборов данных выполнены с использованием методов математической статистики.

Анализ обзора исследований по теме. Вопросам устройства дорожных покрытий и повышения качества уплотнения горячих асфальтобетонных смесей посвящены работы В.В. Бадалова, А.П. Васильева, Н.В. Горельшева, М.Г. Горячева, А.В. Захаренко, А.Ф. Зубкова, Э.В. Котлярского, В.П. Подольского и др. Учеными разработаны теоретические основы уплотнения горячих смесей.

Исследовательскими работами в области асфальтобетона и ЩМА занимались ученые И.В. Королев, Л.Б. Гезенцевей, М.Г. Салихов, Г.Н. Кирюхин, Л.А. Горельшева и др., которые разработали способы проектирования состава, некоторые его закономерности на основных сырьевых материалах, таких как щебень, дробленый песок, минеральный порошок, стабилизирующая добавка.

Динамические свойства битумных вяжущих и асфальтобетона, а также их анализ на основе подхода критерия инкубационного времени исследованы в работе [7]. Изучены условия макроразрушения асфальтобетона и показаны методы управления данным параметром за счет структурных особенностей материала.

Даны рекомендации по выбору материалов в зависимости от условий эксплуатации дороги. Полученные результаты предлагаются для внедрения в разрабатываемые стандарты.

В работе [8] представлены методы и модели планирования и оперативного управления производством асфальтобетонных смесей, которые успешно применялись в течение ряда лет на асфальтобетонных заводах предприятий дорожного строительства.

Современная технология *Superpave* (*Superior PERforming Asphalt PAVements*) проектирования асфальтобетонных покрытий, используемая в США, рассмотрена в работе [9]. Достоинством этих исследований является предложенная методика по выбору и подбору составов асфальтобетонных смесей для дорожных покрытий с учетом различных условий эксплуатации и гранулометрического состава смесей. Несмотря на сложность методики и ее ориентацию на нормативную зарубежную базу, она может быть, при соответствующей адаптации, использована в российской практике.

Рекомендации по расчетно-экспериментальным методам и актуальности скорейшего совершенствования методов проектирования составов асфальтобетонных покрытий отмечаются в работах [10; 11].

Свойства асфальтобетонных смесей и асфальтобетона изучались интенсивно, и исследования продолжают [12]. Внимание исследователей посвящается сравнительному анализу смесей и дренирующих свойств смесей для слоев износа [13], проводится сравнительный анализ нормативных требований к асфальтобетонным покрытиям автомобильных дорог и аэродромов [14].

В последние годы стали больше использоваться современные информационные технологии в проектировании асфальтобетонных смесей, предлагаются программные реализации новых методик проектирования [15]. Кроме того, появился опыт внедрения аппарата интеллектуальных систем в проектировании дорожных покрытий [16–18].

Как показывает обзор, в ходе прогресса, изменения условий эксплуатации дорог и нормативных требований, появления новых материалов и технологий, развития информационных технологий для использования в практике проектирования процесс совершенствования дорожных покрытий далеко не завершен, а учитывая перечисленные факторы, требует дополнительных исследований.

Разработка интеллектуальной системы. *Постановка задачи проектирования асфальтобетонных смесей в содержательном виде.* С 1 июня 2019 г. в Российской Федерации вступили в действие более 20 национальных стандартов новых серий ГОСТ Р 58401 и ГОСТ Р 58402. В основе данных комплексов стандартов лежит метод объемного проектирования асфальтобетонных смесей «*Superpave*» (*Superior Performance Pavements*). *Superpave* — технические условия и метод проектирования составов асфальтобетонных смесей с определением поровых характеристик уплотненных образцов асфальтобетона.

Целью проектирования состава асфальтобетонной смеси является создание структуры асфальтобетона с заранее заданными свойствами, которые должны обес-

печить в конечном итоге требуемые эксплуатационные характеристики дорожного покрытия.

Сущность проектирования состава смеси состоит в выборе минеральных материалов и битумного вяжущего, исходя из их физико-механических свойств, а также в определении такого соотношения компонентов, которое в результате дает наиболее точно требуемую структуру асфальтобетона.

Процесс подбора требуемого состава щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) можно условно разделить на три этапа:

- на первом этапе в результате лабораторных испытаний определяют качество исходных минеральных материалов и битумного вяжущего, чтобы установить соответствие показателей свойств действующим требованиям.

- на втором этапе определяют рациональное соотношение содержания щебня, песка из отсевов дробления, минерального порошка, битума и стабилизирующей добавки в смеси, чтобы обеспечить показатели свойств асфальтобетона, удовлетворяющие требованиям нормативной документации.

- на заключительном этапе рекомендуется проводить технико-экономическое сравнение вариантов подобранных составов смесей, отработку технологии приготовления смеси на асфальтобетонном заводе и, при необходимости, корректирование состава с учетом результатов пробной укладки и испытаний проб смесей из пробных замесов в заводской смесительной установке. Как видно из приведенной схемы процесса, актуальной является задача корректирования состава на втором этапе подбора асфальтобетонной смеси.

Подбор состава зависит от конкретного типа асфальтобетонной смеси. Постановку задачи можно рассмотреть на примере щебеночно-мастичной смеси ЩМА-16 как наиболее массово используемой в дорожном строительстве. При дальнейших исследованиях данную модель можно применять с уточнением параметров для других составов.

При проектировании рецептов, например, по американскому методу «*Superpave*» на кривой зернового состава можно выделить три участка, соответствующих макро-, мезо- и микроструктуре смесей. Сущность метода заключается в создании каркаса из щебня и заполнения пустот между зернами таким образом, чтобы достичь наилучшей упаковки зерен.

Макроструктура. Определена содержанием щебня. Щебень формирует каркас из взаимно соприкасающихся частиц, создает самые крупные межзерновые пустоты. Также повышенное содержание щебня создает шероховатую текстуру поверхности и хорошее сцепление с колесом автомобиля.

Мезоструктура. Определена содержанием крупного песка. Зерна песка занимают большую часть объема асфальтобетона, частично формируют каркас и в то же время заполняют пустоты между частицами щебня и позволяют получить равномерную структуру гранулометрического состава. Зерна песка придают положительные свойства в формировании структуры асфальтобетона в процессе его уплотнения.

Микроструктура. Микроструктура создается мелким песком и минеральным порошком, которые запол-

няют пустоты и раздвигают зерна крупного заполнителя. Содержание мелкого заполнителя способствует повышению плотности асфальтобетона.

Битум. Качество смеси ЩМА во многом зависит от содержания битумного вяжущего. Здесь особая роль отводится повышению вязкости и прочности битумного вяжущего. Технологические свойства и уплотняемость смеси улучшаются с увеличением содержания битума. Однако происходит это до соотношения 5,5 %, так как слишком большое содержания битума вызывает высокую подверженность пластическим деформациям и, как следствие, асфальтобетон плохо работает на сдвигающие нагрузки от колеса автомобиля. Следовательно, дальнейшее увеличение содержания битума приводит к снижению его эксплуатационных свойств.

Подбор состава асфальтобетонной смеси считается законченным, если все показатели физико-механических свойств, полученные при испытании асфальтобетонных образцов, будут отвечать требованиям стандарта. Однако в рамках стандартных требований к асфальтобетону состав смеси рекомендуется оптимизировать с целью повышения эксплуатационных свойств и долговечности устраиваемого конструктивного слоя дорожной одежды.

Выбор наилучшего состава смеси, предназначенного для устройства верхних слоев дорожных покрытий, до последнего времени связывали с повышением плотности асфальтобетона. Уплотнение асфальтобетона — один из важнейших структурообразующих факторов. После уплотнения асфальтобетонной смеси значительно повышается ее объемная масса, покрытие приобретает необходимую плотность, прочность и водоустойчивость. От степени уплотнения зависят важнейшие эксплуатационные свойства асфальтобетонных покрытий. Качество уплотнения щебеночно-мастичного асфальтобетонного слоя по ГОСТ определяют по содержанию воздушных пустот P_a в кернах — образцах-вырубках. Данным параметром контролируется степень уплотнения.

Исходными материалами для производства асфальтобетонной смеси являются минеральные компоненты (щебень, природные и дробленые пески, минеральный порошок), битумное вяжущее и стабилизирующая добавка, взятые в необходимых соотношениях и перемешанные при определенной температуре. Процесс приготовления и укладки покрытий характеризуется многими технологическими и техническими параметрами, изменчивыми в широких диапазонах и на всех этапах строительства. Но, как было показано, на качество покрытия в первую очередь влияют гранулометрический состав песчано-щебеночных компонентов и битумное вяжущее. Таким образом, эти параметры являются самыми значимыми для эксплуатационных свойств покрытий, а для характеристик — самыми информативными, поэтому в дальнейшем принимаем их для исследований и разработки методики определения степени уплотнения смесей.

Обоснование входных и выходной переменных для интеллектуальной системы. Ориентируясь на исполь-

зование аппарата современных интеллектуальных систем и на основании постановки задачи в содержательном виде, можно определить входные и выходную переменные задачи.

Входные переменные. В качестве входных переменных определен следующий компонентный и фракционный состав смеси в процентах с использованием наиболее значимых исходных фракций и материалов в диапазоне 4–16 мм:

- щебень крупной фракции (*Large Crushed Stone (LCS)*) — 11,2–16 мм);
- щебень средней фракции (*Medium Crushed Stone (MCS)*) — 8–11,2 мм);
- щебень мелкой фракции или отсева (*Fine Crushed Stone (FCS)*) — 4–8 мм);
- битум (*Bitumen (B)*).

Выходная переменная. Выходной переменной принимается величина содержания воздушных пустот, которая является достаточно информативной и определяет основное назначение будущего состава.

Формально постановка задачи подбора типа смеси по содержанию воздушных пустот P_a запишется в виде:

$$P_a = f(LCS, MCS, FCS, B).$$

Обоснование типа интеллектуальной системы. В настоящее время создано много различных типов интеллектуальных систем, которые основаны на различных концепциях [17]. Например, большое распространение получили нечеткие системы, основанные на базах правил [18–20]. Другая концепция включает нейронные сети [21]. Каждый вид интеллектуальных систем имеет свои преимущества и недостатки. Например, в нечеткой системе используется методика нечеткого вывода с применением базы правил и лингвистических переменных. В нейронных сетях предусмотрено соединение элементов по типу мозгоподобной структуры, состоящей из нейронов. Для объединения преимуществ обеих типов была создана адаптивная нейронечеткая сеть *ANFIS (Adaptive Network Neuron Fuzzy Interference)*. Специфика задачи заключается в некоторой неопределенности входных и выходных параметров смесей. Поэтому нейронечеткая адаптивная сеть *ANFIS* будет в большей степени подходить для решения задачи определения основной характеристики дорожного покрытия.

Разработка обучающих выборок для настройки нейросети. Для создания сети необходимо подготовить обучающие выборки. С целью большей адекватности данные для входных параметров в виде обучающих выборок были подготовлены в результате экспериментальных исследований в сертифицированной лаборатории. В ходе промышленного изготовления смеси отбирались пробы исходных фракций наполнителя, заполнителя и битума по ГОСТ 58402-2019. Из приготовленной смеси отбирались замеры и определялась величина параметра содержания воздушных пустот по ГОСТ 58401.8-2019. Результаты измерений и обработки статистических данных в виде сформированных обучающих выборок приведены в таблице.

Таблица. Обучающие выборки нейронной сети для определения состава щебеночной смеси

№	Входные параметры				Выходной параметр Содержание воздушных пустот, P_a , %
	Щебень фракции 11,2–16 мм, LCS , %	Щебень фракции 8–11,2 мм, MCS , %	Щебень фракции 4–8 мм, FCS , %	Битум, B , %	
1	45,4	6,1	17,5	5,0	2,3948
2	40,6	11,3	17,0	5,1	2,5082
3	46,4	5,2	17,5	4,9	3,4157
4	47,2	4,7	18,9	5,2	3,8448
5	40,6	11,3	18,9	5,2	4,0653
6	40,7	11,4	18,9	5,0	2,5118
7	40,8	10,4	17,0	5,0	2,2611
8	39,9	2,8	26,8	5,1	3,0468

Примечания. 1) Температура изготовления смеси $T = 165$ °C; 2) содержание исходных материалов указано в % от массы смеси; 3) требуемое содержание воздушных пустот для образцов, изготовленных в лаборатории для ЩМА-16, составляет от 2,0 до 4,0 %.

Программная реализация нейронной сети в *Matlab*. Для реализации нейронной сети использована среда *Neuro-Fuzzy Designer* приложения *Matlab* [3].

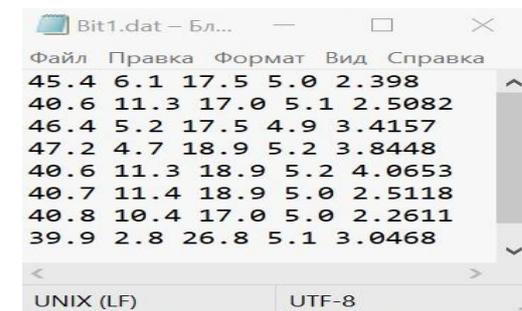
Перед запуском приложения создается файл с форматом *Bit1.dat* куда заносятся данные значений обучающих выборок (рис. 1, а).

Затем данные загружаются в приложение (рис. 1, б). После задания параметров входных нечетких переменных (рис. 1, в, г), генерации структуры сети (рис. 1, д), задается методика нечеткого вывода для выходной переменной (методом Сугено).

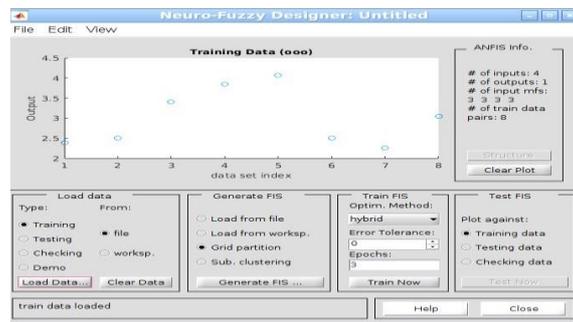
Выбранные и скорректированные лингвистические переменные для входных данных определены как показано на рис. 1, г.

Запускается процедура обучения сети (рис. 1, е), при этом задано 10 эпох обучения. Процесс обучения отображается в командном окне *Matlab* (рис. 1, ж), где выведено значение среднеквадратической ошибки $RMSE$ результата обучения, равное 0,000009.

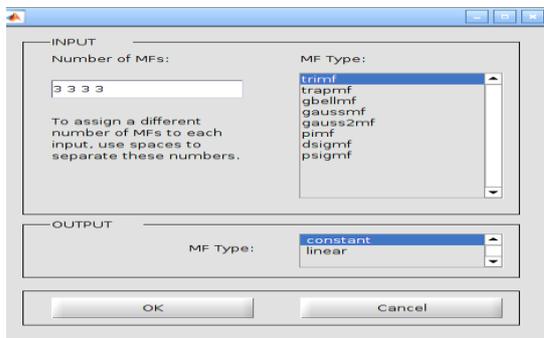
Обучение нейронной сети и проверка адекватности на тестовых примерах. Нейронная сеть далее обучается на тестовых примерах, т. е. еще несколько выборок данных загружаются, как и первоначальные, и аналогично выполняется проверка (процедура *Checking*) (рис. 1, з).



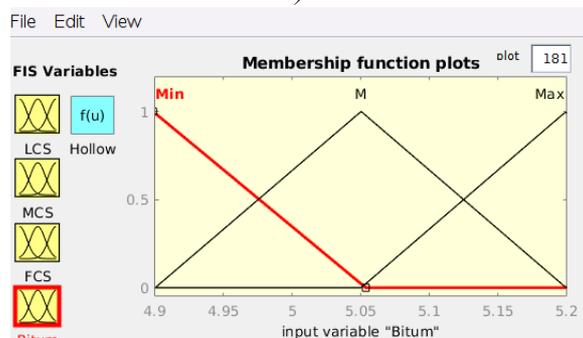
а)



б)



в)



г)

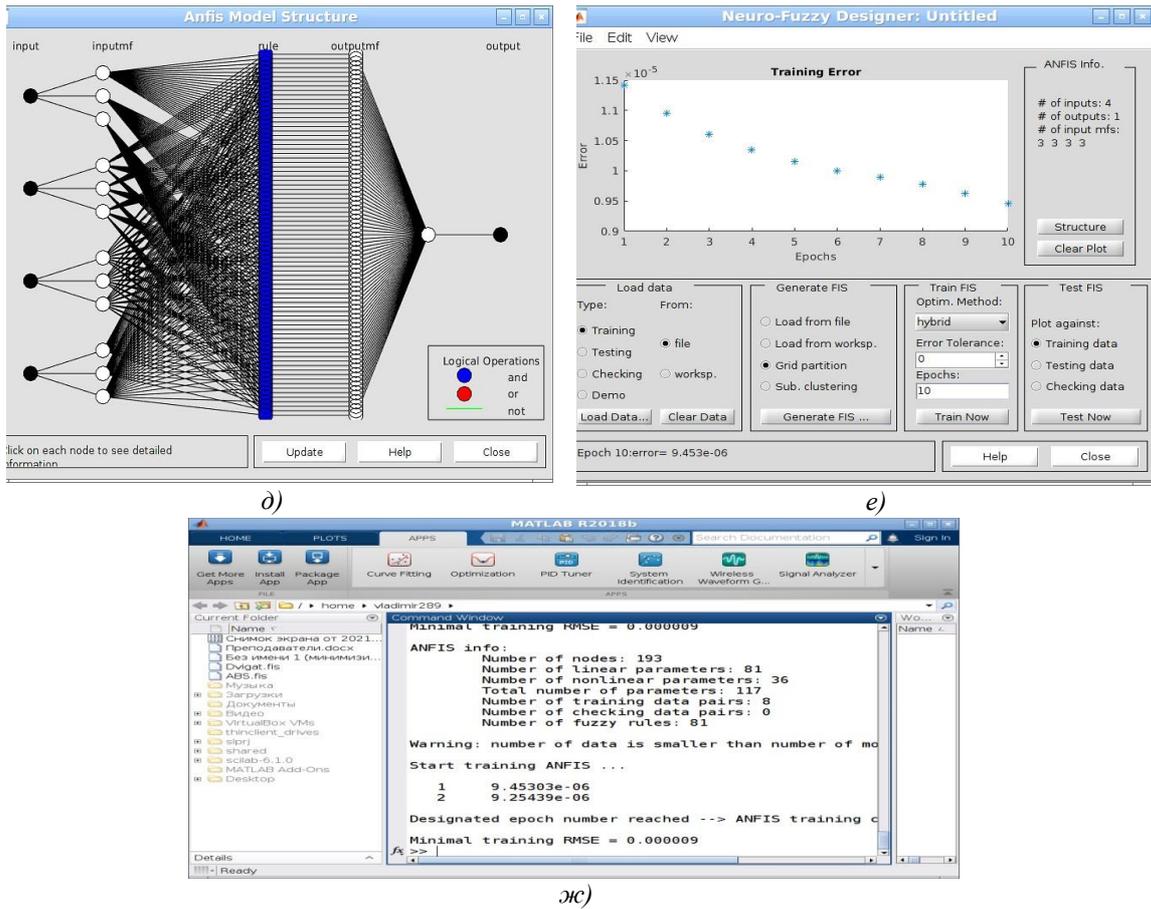


Рис. 1. Процедура создания нейронечеткой сети в системе *Matlab*: а — файл с обучающими выборками; б — загрузка данных; в — задание параметров нечеткой системы; г — переменная «*Bitum*» (переменные «*MCS*», «*LCS*» и «*FCS*» заданы аналогично); д — генерация нейронной сети; е — отображение процесса обучения; ж — процесс обучения нейросети

Анализ результатов (обсуждение). Проверка модели на адекватность и ее работа в среде *Matlab* выполняются достаточно просто в процедуре *RuleViewer* (рис. 2), где задаются любые значения исходных данных и автоматически одновременно выводится значение результата. На рис. 2 для заданных исходных данных $LCS = 39,9$; $MCS = 2,8$; $FCS = 26,8$; $Bitum = 5,1$. Получено значение $Hollow = 3,05$, которое отличается от заданного $3,0468$ на величину $0,0032$, что говорит о достаточной адекватности модели.

Одной из особенностей нейросети являются ее ограничения в заданных диапазонах параметров. Для расширения этих диапазонов необходимо провести заново обучение по приведенной в настоящей работе методике.

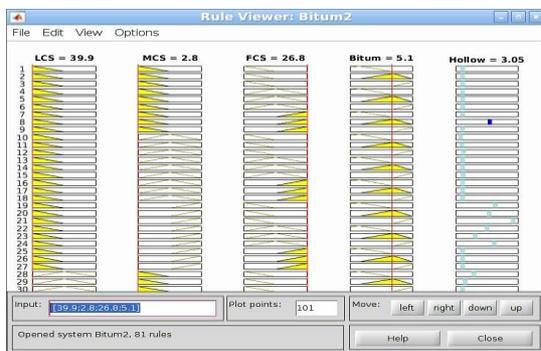


Рис. 2. Расчеты функции $Hollow = f(LCS, MCS, FCS, Bitum)$ по разработанной модели нейросети в процедуре *RuleViewer*

Если обсуждать результаты с точки зрения отличия от существующих исследований, то можно проанализировать их по критериям научной и практической ценности:

- отличие от известных результатов;
- научная новизна;
- практическая применимость.

Главное отличие заключается в решении задачи расчета содержания воздушных пустот с использованием нейронечеткой сети. *Научную новизну* результатов обуславливает впервые предложенный теоретический подход к определению одной из важнейших физических характеристик уплотненных асфальтобетонных смесей для устройства дорог на основе интеллектуальной системы в виде нейронечеткой продукционной сети.

Практическая применимость результатов заключается в использовании при подборе асфальтобетонных смесей для дорожных покрытий различного назначения: лесных дорог, а также автомобильных дорог общего пользования.

Выводы. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. В современных условиях все возрастающих требований к повышению качества автомобильных дорог, нагрузок тяжелого и крупногабаритного транспорта на лесные дороги, изменения нормативных требований, увеличения номенклатуры строительных материалов, развития технологий появляется необходимость совершенствования методов проектирования дорожных покрытий. Та-

кие задачи наиболее эффективно решаются на базе новых теоретических подходов, предлагаемых достижениями математики и информационных технологий.

2. Предложенная интеллектуальная система в виде нейронечеткой сети позволяет достаточно точно решить задачу подбора асфальтобетонных смесей для

дорожных покрытий и автоматизировать этот трудоемкий процесс.

3. Программная реализация разработанной модели интеллектуальной системы в среде *Matlab*, а также ее достаточная адекватность позволяют рекомендовать результаты для использования в практике проектирования дорожных покрытий.

Литература

- ГОСТ Р 58401. Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Введ. 01.06.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.
- Булдаков С.И. Последовательность выполнения проекта по строительству автомобильных дорог. Екатеринбург: Уральский гос. лесотехнический ун-т, 2017. 177 с.
- Горбаченко В.И., Ахметов Б.С., Кузнецова О.Ю. Интеллектуальные системы: нечеткие системы и сети. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2018. 105 с.
- Рашид Тарик. Создаем нейронную сеть: пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика», 2019. 272 с.
- Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001. 760 p.
- MATLAB Release Notes for R2008a. MathWorks. Available at. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes>. Highlight (accessed: 15.02.19).
- Смирнов И.В., Петров Ю.В. Анализ динамической прочности битумных вяжущих для асфальтобетона в терминах критерия инкубационного времени разрушения // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 2. С. 24-34.
- Адигамов А.Э., Хайруллина А.Р. Метод линейного программирования в задачах планирования и оперативного управления производством асфальтобетонных смесей // Горный информ.-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 371-374.
- Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии superpave // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 8-14.
- Котлярский Э.В., Урьев Н.Б. Расчетно-экспериментальная методика проектирования состава асфальтобетона с учетом структурно-механических характеристик асфальтобетонных смесей и асфальтобетона // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2009. № 1. С. 10-12.
- Руденский А.В. Рациональное использование строительных материалов и ресурсосбережение - актуальные направления повышения эффективности работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 76-80.
- Котлярский Э.В. Структурно-механические свойства асфальтобетонных смесей и асфальтобетона // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 4. С. 4-8.
- Углова Е.В., Ширяев Н.И., Ни Г., Поздняков Н.О. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств щебеночно-мастичных и дренирующих асфальтобетонных смесей для слоев износа // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 9-15.
- Каргин Р.В., Каргина Д.Р., Чернецкая С.В. Сравнительный анализ нормативных требований к асфальтобетонным покрытиям автомобильных дорог и аэродромов // Наукоедение: интернет-журнал. 2016. Т. 8. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/72TVN616.pdf> (доступ свободный).
- Денисов В.П., Траутвайн А.И., Яковлев Е.А. Разработка математического инструмента расчета температуры смешивания и уплотнения асфальтобетонной смеси // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 8-13.
- Побединский В.В., Булдаков С.И., Берстнев А.В., Анастас Е.С. Нейронечеткая сеть для оценки технологических решений устройства лесных дорог // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 3 (39). С. 95-103.
- Побединский В.В., Кручинин И.Н., Шавнина М.В., Шакирьянов Д.И. Нейронная сеть для оценки транспортно-эксплуатационного состояния лесных автомобильных дорог // Деревообрабатывающая пром-сть. 2020. № 3. С. 10-18.
- Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Kovalev R.N. Fuzzy simulation of forest road surface parameters // The open access IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) provides a fast, versatile and cost-effective proceedings publication service. 2019. V. 326, iss. 1. № 12026.
- Крамаров С.О., Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Таран В.Н. Современные методы анализа и синтеза интеллектуально-адаптивного управления: моногр. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2017. 238 с.
- Хултен Джефф. Разработка интеллектуальных систем: пер. с англ. В.С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2019. 284 с.

References

- GOST R 58401. Automobile roads of general use. Asphalt mixtures and asphalt concrete for road pavement. Volumetric-functional design system. Vved. 01.06.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 15 p.
- Buldakov S.I. Sequence of implementation of the project for the construction of highways. Ekaterinburg: Ural'skij gos. lesotekhnicheskij un-t, 2017. 177 p.
- Gorbachenko V.I., Ahmetov B.S., Kuznecova O.YU. Intelligent systems: fuzzy systems and networks. 2-e izd., ispr. i dop. М.: Izd-vo YUrajt, 2018. 105 p.
- Rashid Tarik. We create a neural network: per. s angl. SPb.: ООО «Dialektika», 2019. 272 p.
- Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001. 760 p.
- MATLAB Release Notes for R2008a. MathWorks. Available at. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes>. Highlight (accessed: 15.02.19).
- Smirnov I.V., Petrov YU.V. Analysis of the dynamic strength of bituminous binders for asphalt concrete in terms of the criterion of the incubation time of destruction // Physical Mechanics. 2020. V. 23. № 2. P. 24-34.
- Adigamov A.E., Hajrullina A.R. Method of linear programming in the problems of planning and operational management of the production of asphalt-concrete mixtures // Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2015. № 2. P. 371-374.
- Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using superpave technology // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. № 3. P. 8-14.
- Kotlyarskij E.V., Ur'ev N.B. Calculation and experimental method of designing the composition of asphalt concrete taking into account the structural and mechanical characteristics of asphalt concrete mixtures and asphalt concrete // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. № 1. P. 10-12.
- Rudenskij A.V. Rational use of building materials and resource saving are topical directions for increasing the effi-

- ciency of work in the construction and repair of highways // *Stroitel'nye materialy*. 2017. № 3. P. 76-80.
12. Kotlyarskij E.V. Structural and mechanical properties of asphalt concrete mixtures and asphalt concrete // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2008. № 4. P. 4-8.
 13. Uglova E.V., SHiryayev N.I., Ni G., Pozdnyakov N.O. Comparative analysis of the performance properties of crushed stone-mastic and draining asphalt concrete mixtures for wear layers // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. № 1. P. 9-15.
 14. Kargin R.V., Kargina D.R., CHERneckaya S.V. Comparative analysis of regulatory requirements for asphalt concrete pavements of highways and airfields // *Naukovedenie: internet-zhurnal*. 2016. V. 8. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/72TVN616.pdf> (dostup svobodnyj).
 15. Denisov V.P., Trautvain A.I., YAKovlev E.A. Development of a mathematical tool for calculating the temperature of mixing and compaction of asphalt concrete mixture // *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. № 8. P. 8-13.
 16. Pobedinskij V.V., Buldakov S.I., Berstenev A.V., Anastas E.S. Neuro-fuzzy network for evaluating technological solutions for forest roads // *Forestry Engineering Journal*. 2020. V. 10. № 3 (39). P. 95-103.
 17. Pobedinskij V.V., Kruchinin I.N., SHavnina M.V., SHakirzyanov D.I. Neural network for assessing the transport and operational state of forest roads // *Derevoobrabatival'naya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2020. № 3. P. 10-18.
 18. Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Kovalev R.N. Fuzzy simulation of forest road surface parameters // *The open access IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) provides a fast, versatile and cost-effective proceedings publication service*. 2019. V. 326, iss. 1. № 12026.
 19. Kramarov S.O., Smirnov YU.A., Sokolov S.V., Taran V.N. *Modern methods of analysis and synthesis of intelligent-adaptive control: monogr. M.: RIOR: INFRA-M, 2017. 238 p.*
 20. Hulten Dzheff. *Development of intelligent systems: per. s angl. V.S. YAcenkova. M.: DMK Press, 2019. 284 p.*