

Автоматическая программа подбора состава асфальтобетонной смеси с учётом условий Вьетнама

Д.Н. Суворов, А.В. Илюхин, С.В. Нгуен

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Аннотация: Асфальтобетонные смеси являются основным строительным материалом для дорожного покрытия, и точное проектирование их состава играет ключевую роль в качестве и долговечности дорожных покрытий. В данной статье обсуждаются проблемы, связанные с проектированием состава асфальтобетонной смеси, а также представляется разработанная система автоматического подбора смеси. Система автоматического подбора состава асфальтобетонных смесей представляет собой мощный инструмент для оптимизации процесса подбора материалов, используемых в дорожном строительстве. Эта система может рассчитать оптимальный состав смеси, учитывая технические и экономические ограничения, что приводит к повышению точности и надёжности подбора состава смеси. Преимущества этой системы включают сокращение времени и затрат на процесс подбора, возможность тестирования и анализа различных вариантов смеси, что в итоге улучшает качество и долговечность дорожных покрытий.

Ключевые слова: асфальтобетон, асфальтобетонная смесь, подбор состава, метод наименьших квадратов, метод линейного программирования, программное обеспечение, автоматизация, Python, Microsoft Access.

Введение

На сегодняшний день асфальтобетон считается самым распространённым материалом для строительства качественных дорог как во всем мире, так и во Вьетнаме [1, 2]. Следовательно, обеспечение его необходимыми физико-механическими характеристиками представляет собой важнейшую задачу. Для достижения этой задачи значительную роль играет правильное проектирование состава асфальтобетонной смеси.

Проектирование асфальтобетонной смеси – это процесс разработки состава смеси, который обеспечивает необходимые технические характеристики для конкретного типа дорожного покрытия или других асфальтобетонных конструкций. Цель проектирования асфальтобетонной смеси заключается в создании смеси, которая обладает необходимыми механическими, физическими и эксплуатационными свойствами для обеспечения долговечности, безопасности и комфортности дорожного движения [3].

Процесс проектирования состава асфальтобетонной смеси является многоэтапным и требует высокой точности и тщательности. Ошибки на этом этапе могут привести к серьёзным последствиям, включая снижение качества дорожного покрытия, перерасход материалов и финансовых ресурсов. В связи с этим автоматизация процесса проектирования состава асфальтобетонной смеси позволяет исключить ошибки при расчётах, минимизировать вероятность корректировок и сократить временные затраты на весь процесс проектирования. Для повышения эффективности технологического процесса приготовления асфальтобетонной смеси необходимо автоматизировать расчётные операции при проектировании её состава.

Материалы и методы исследования

Проектирование асфальтобетонной смеси включает в себя пять основных этапов [3-5]:

1. Оценка условий эксплуатации дорожного покрытия: Анализ условий, в которых будет эксплуатироваться дорожное покрытие, включая интенсивность и тип дорожного движения, климатические условия и прогнозируемые нагрузки.

2. Оценка исходных материалов: Изучение доступных материалов, таких как щебень, песок, минеральный порошок и битум, с целью определения их пригодности и соответствия стандартам.

3. Анализ процесса производства, укладки и уплотнения смеси: Определение оптимальных технологий приготовления, укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси, а также разработка технологических регламентов, обеспечивающих стабильное качество работ.

4. Подбор состава асфальтобетонной смеси: Определение оптимального соотношения компонентов смеси посредством расчётов и

проведения пробных замесов для достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

5. Экономическая оценка: Если в процессе проектирования смеси возникает более двух вариантов, необходимо провести сравнительный экономический анализ для выбора наиболее эффективного и экономически целесообразного варианта.

Три этапа процесса подбора минерального состава асфальтобетона обеспечивают его качество и соответствие требованиям:

1. Оценка качества минеральных материалов и битума: на этом этапе производится тщательный анализ качества всех основных компонентов асфальтобетона, включая щебень, песок, минеральный порошок и битум, и проверяется их соответствие установленным стандартам и требованиям. Это включает в себя физико-механические испытания и анализ химического состава.

2. Расчёт оптимального соотношения минеральных компонентов. Используя результаты оценки качества материалов и учитывая требования к плотности и прочности асфальтобетона для конкретного проекта, выполняются расчёты для определения оптимального соотношения щебня, песка и минерального порошка.

3. Определение оптимального содержания битума: после определения оптимального состава минеральных компонентов проводится определение необходимого содержания битума в смеси. Битум играет ключевую роль в связывании минеральных компонентов и обеспечении устойчивости асфальтобетона к механическим нагрузкам и температурным воздействиям. Этот этап включает лабораторные испытания, такие как тестирование на устойчивость к деформациям и анализ поведения смеси при различных температурных условиях.

Таким образом, проектирование асфальтобетонной смеси требует внимательного и системного подхода на каждом этапе для обеспечения долговечности и надёжности дорожного покрытия.

Самым распространённым методом подбора состава асфальтобетона во Вьетнаме является метод Маршалла [6]. Минеральные компоненты: щебень, песок и минеральный порошок подбираются таким образом, чтобы гранулометрический состав лежал в пределах между заданными предельными кривыми и обладал максимально возможной плавностью [7].

Для любой смеси проходки P_i через сито с размером i всегда соответствует следующему соотношению:

$$P_i = A_i a_1 + B_i a_2 + C_i a_3 + D_i a_4 + \dots, \quad (1)$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \dots = 1, \quad (2)$$

где $A_i, B_i, C_i, D_i, \dots$ – проходки (%) через сито с размером i для каждого материала; $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$ – доля каждого материала.

Во Вьетнаме для определения отношения между материалами ($a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$) используются различные методы, включая графический анализ [8] и функцию "Solver" в Excel [6]. Однако эти подходы имеют свои ограничения, поэтому мы рассматриваем использование метода наименьших квадратов для более эффективного определения отношений между материалами. Метод наименьших квадратов – это статистический метод, который используется для аппроксимации точечных данных линейной функцией с минимальной суммой квадратов отклонений [9].

Допустим, у нас есть m материалов, и нам нужно найти отношение между ними так, чтобы линия гранулометрического состава попадала в заданную границу и приближалась к регламентированной линии гранулометрического состава.

При размере сита D_j проходка через сито для материала i равна P_{ij} , регламентированная проходка составляет P_j , а фактическая проходка – P_{kj} , как показано в таблице 1.

Таблица № 1

Обозначение для каждого материала

Материалы	Доля	Проходка P (%) через сито D_j					
		D_1	D_2	...	D_j	...	D_n
1-ый материал	a_1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1j}	...	P_{1n}
2-ый материал	a_2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2j}	...	P_{2n}
...
i -ый материал	a_i	P_{i1}	P_{i2}	...	P_{ij}	...	P_{in}
...
m -ый материал	a_m	P_{m1}	P_{m2}	...	P_{mj}	...	P_{mn}
Фактические проходки		P_{k1}	P_{k2}	...	P_{kj}	...	P_{kmn}
Регламентированные проходки		P_1	P_2	...	P_j	...	P_n

Уравнение (1) можно переписать следующим образом

$$P_{kj} = a_1 P_{1j} + a_2 P_{2j} + \dots + a_i P_{ij} + \dots + a_m P_{mj} = \sum_{i=1}^m a_i P_{ij}, \quad (3)$$

Доля a_i каждого материала считается оптимальной только тогда, когда фактический гранулометрический состав находится в заданной границе и приближается к регламентированному гранулометрическому составу, то есть:

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_{kj} \leq P_{\max} \\ \sum_{j=1}^n (P_{kj} - P_j)^2 = \sum_{j=1}^n (E_j)^2 = \min \end{cases}, \quad (4)$$

где P_{\min} , P_{\max} – нижняя и верхняя граница; E_j – отклонение фактического от регламентированного гранулометрического состава. $E_j = P_{kj} - P_j$ (Рис. 1).

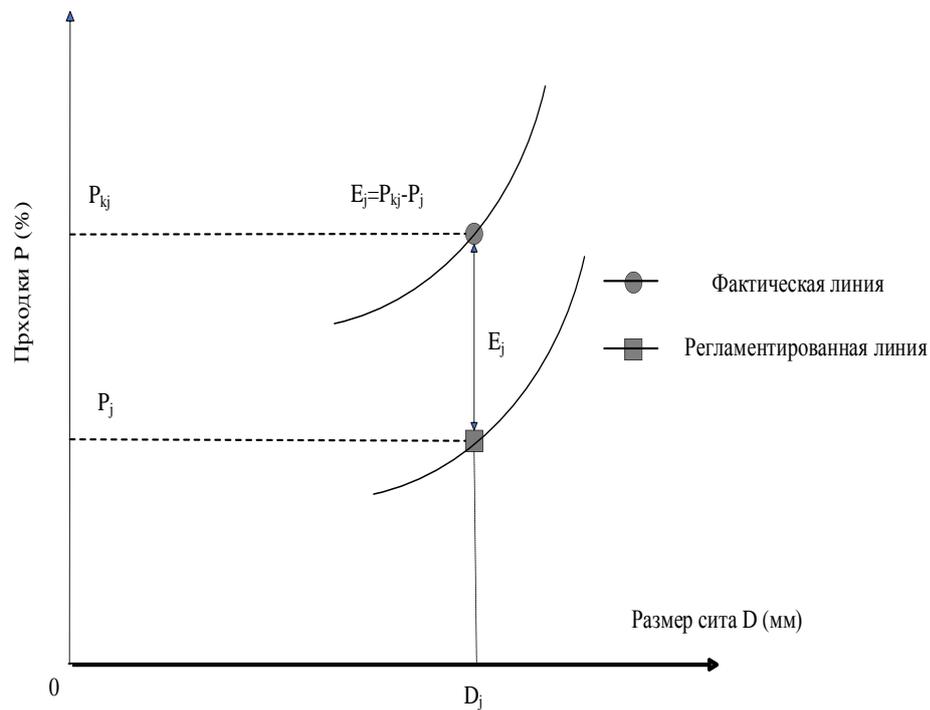


Рис. 1. – Отклонение фактического от регламентированного гранулометрического состава

Из уравнения (4) следует:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sum_{j=1}^n (E_j)^2}{\partial a_1} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial \sum_{j=1}^n (E_j)^2}{\partial a_i} = 0, \\ \dots \\ \frac{\partial \sum_{j=1}^n (E_j)^2}{\partial a_n} = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) приводит к установлению соотношения между каждым материалом, соответствующего критерию минимизации суммы квадратов разностей между фактическими и нормативными (регламентированными) значениями. Для проверки гипотезы и подтверждения предполагаемого метода используются данные, представленные в таблице 2. Задача заключается в определении оптимального соотношения между пятью материалами для

асфальтобетонной смеси типа ВТНС 19 (ВТНС 19 – Это плотная асфальтобетонная смесь с номинальным максимальным размером минерального заполнителя 19 мм и максимальным размером минерального заполнителя 25 мм).

Таблица № 2

Гранулометрический состав материалов

Размер сита (мм)	Проходки (%)							
	Верхняя граница	Нижняя граница	Регламент	Щебень 1	Щебень 2	Щебень 3	Песок	МП
25	100	100	100	100	100	100	100	100
19	100	90	95	90	100	100	100	100
16	92	78	85	50	80	100	100	100
12.5	78	62	70	5	40	100	100	100
9.5	72	50	61	2	5	94	100	100
4.75	56	26	41	2	5	50	100	100
2.36	44	16	30	2	5	30	80	100
1.18	33	12	22.5	0	0	20	50	100
0.6	24	8	16	0	0	10	40	100
0.3	17	5	11	0	0	5	30	98
0.15	13	4	8.5	0	0	2	20	95
0.075	7	3	5	0	0	1	10	92

Результаты исследования представлены в таблице 3 и на рисунке 2.

Таблица № 3

Суммарное отклонение фактического от регламентированного гранулометрического состава

Метод	Суммарное отклонение $\sum_{j=1}^n (E_j)^2$
Solver 1	45.28
Solver 2	11.94
Solver 3	17.62
Метод наименьших квадратов	1.24

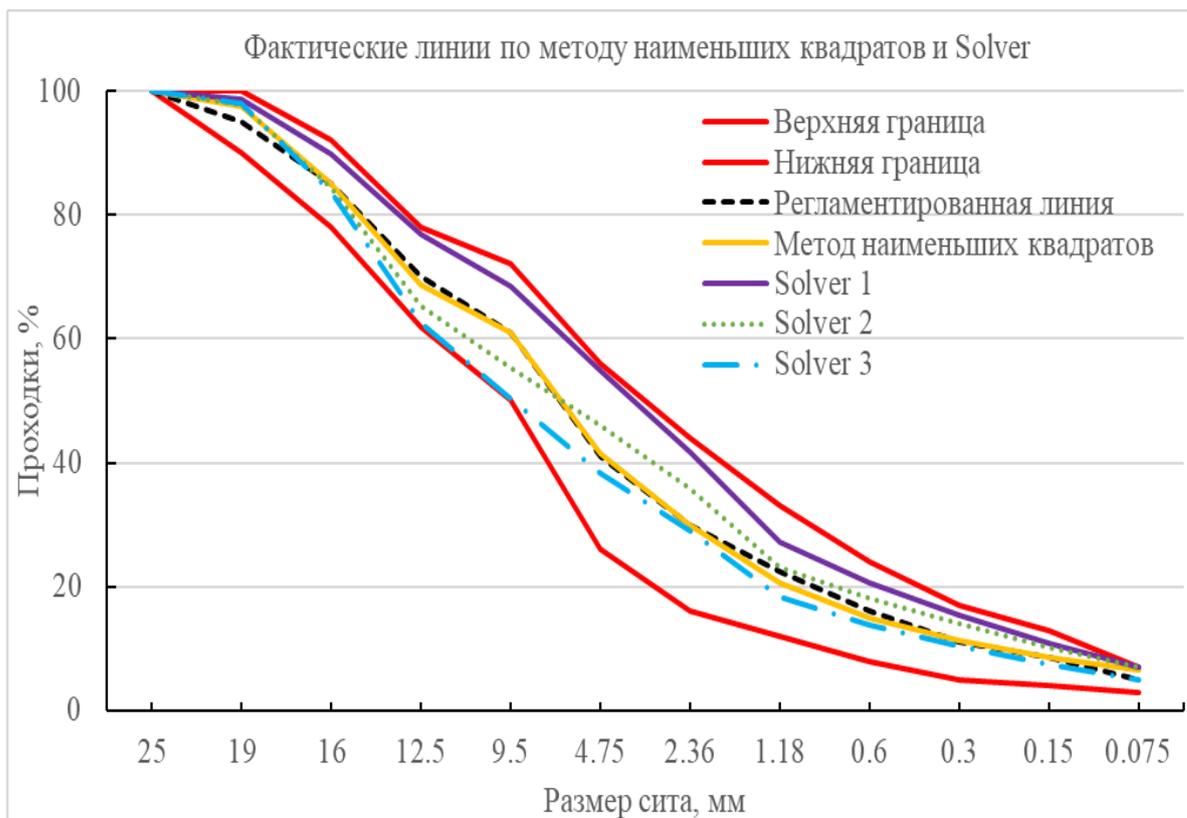


Рис. 2. – Фактические линии гранулометрического состава по методу наименьших квадратов и Solver

Из рисунка 2 и таблицы 3 видно, что линия гранулометрического состава, полученная методом наименьших квадратов, демонстрирует меньшее отклонение от регламентированной линии и обладает более плавным характером, чем линии гранулометрического состава, полученные с использованием Solver в Excel. Это свидетельствует о высокой эффективности метода наименьших квадратов для решения задач оптимизации состава асфальтобетонной смеси.

На основе предполагаемого метода мы разрабатываем автоматическую программу подбора состава асфальтобетонной смеси. Программа будет написана на языке Python, что позволит обеспечить высокую степень автоматизации и гибкости в настройке параметров расчёта. В разработке будут учтены ключевые аспекты, такие как использование библиотек для

численного анализа и оптимизации (например, NumPy, SciPy), а также возможности визуализации данных (например, Matplotlib) [10, 11].

Общая структура программы автоматического подбора состава асфальтобетонной смеси представлена на рисунке 3.

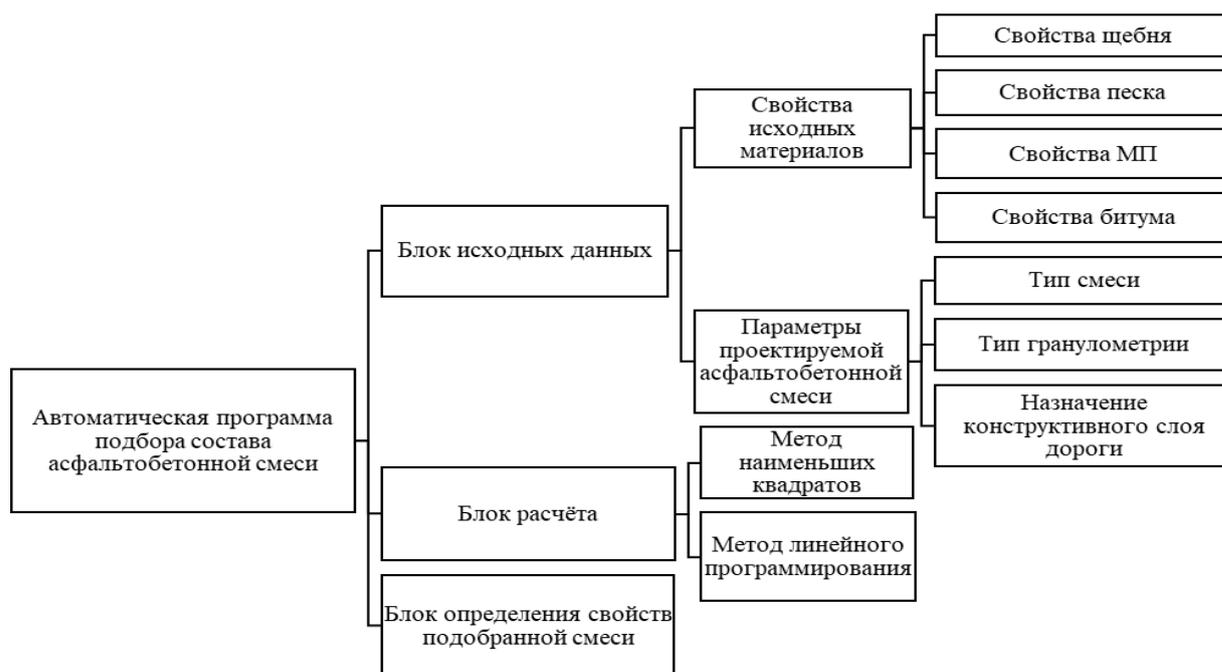


Рис. 3. – Общая структура программы автоматического подбора состава асфальтобетонной смеси

Для подбора состава асфальтобетонной смеси критически важно учитывать физико-механические и химические свойства всех компонентов: щебня, песка, минерального порошка, битума и добавок. Например, данные о щебне, полученные в результате лабораторных испытаний, включают информацию о поставщике, месте подбора, стоимости, дате получения и испытания, а также параметры прочности, плотности, сцепления с битумом и гранулометрический состав. После введения данных гранулометрического состава щебня программа автоматически рассчитывает остатки на ситах и использует их в проектировании асфальтобетонной смеси (Рис. 4). Программа также позволяет учитывать различные виды щебня в одной

смеси. После ввода данных о каждом компоненте они сохраняются в базе данных (Microsoft Access). Это обеспечивает долгосрочное хранение информации и лёгкий доступ к ней для последующего использования в процессе оптимизации состава асфальтобетона. Такой подход значительно упрощает управление и обновление данных, а также повышает эффективность процесса проектирования асфальтобетонных смесей.



Рис. 4. – Интерфейс окна введённых исходных характеристик щебня

Блок расчёта предоставляет возможность определить необходимый состав асфальтобетонной смеси с учётом заданных характеристик. Для этого выбирается соответствующий тип смеси, вид гранулометрии и другие параметры. На основе входных данных материалов определяется доля каждого компонента. В программе реализованы два метода расчёта состава смеси:

- Метод наименьших квадратов: этот метод направлен на минимизацию отклонения фактического гранулометрического состава от регламентированного;
- Метод линейного программирования: его целью является достижение минимальной стоимости одной тонны смеси.

Рекомендуется использовать метод наименьших квадратов для определения отношения компонентов смеси, поскольку при использовании метода линейного программирования гранулометрический состав может быть менее плавным.

После установки соотношений между компонентами минеральной части необходимо определить оптимальное количество битума. Это значение может быть получено путём анализа опыта, применения расчётных формул или интерпретации результатов испытаний. Оптимальное содержание битума, определённое на основе расчётных формул, называется прогнозируемым оптимальным содержанием битума.

Формула для расчёта прогнозируемого оптимального содержания битума имеет следующий вид [6]:

$$P_{\text{б}} = 0,035 * a + 0,045 * b + K * c + F, \quad (6)$$

где $P_{\text{б}}$ – прогнозируемое оптимальное содержание битума в смеси, % по массе; a – содержание минерального заполнителя, удерживаемого на сите с ячейкой размером 2,36 мм, % по массе; b – содержание минерального заполнителя, проходящего через сито с ячейкой размером 2,36 мм и удерживаемого на сите с ячейкой размером 0,075 мм, % по массе; c – содержание минерального заполнителя, проходящего через сито с ячейкой размером 0,075 мм, % по массе; $K = 0,15$ при содержании заполнителя, проходящего через сито с ячейкой размером 0,075 мм, 11–15 %; $K = 0,18$ при содержании заполнителя 6–10 %; $K = 0,20$ при содержании заполнителя не более 5 %; F выбирает значения от 0,2 до 0,6 в зависимости от степени адсорбции битума заполнителя.

На рисунке 5 изображен интерфейс окна проектирования состава асфальтобетонной смеси. В данном случае представлен расчет состава асфальтобетонной смеси типа ВТНС 19 с применением метода наименьших квадратов, который является одним из методов математической

оптимизации. Прогнозируемое оптимальное содержание битума составляет 5,5% по массе. Более того, программа автоматически определяет стоимость материалов для производства 1 тонны смеси. В данном примере стоимость 1 тонны материалов составляет 984,127 VNĐ (вьетнамский донг), что эквивалентно примерно 3500 рублям.



Рис. 5. – Интерфейс окна проектирования состава асфальтобетонной смеси

После производства смеси проводят испытание образцов, результаты которых записываются в окне "Испытание образцов асфальтобетонной смеси в лаборатории". В этом окне автоматически рассчитываются основные показатели асфальтобетонной смеси (Рис. 6 а):

- Общая объемная плотность заполнителя (G_{sb});
- Общая истинная плотность заполнителя (G_{sa});
- Эффективная плотность заполнителя (G_{se});
- Содержание абсорбированного вяжущего (P_{ba});

- Содержание эффективного вяжущего (P_{be});
- Содержание пустот в минеральном заполнителе (VMA);
- Содержание воздушных пустот (V_a);
- Содержание пустот, заполненных битумом (VFA).

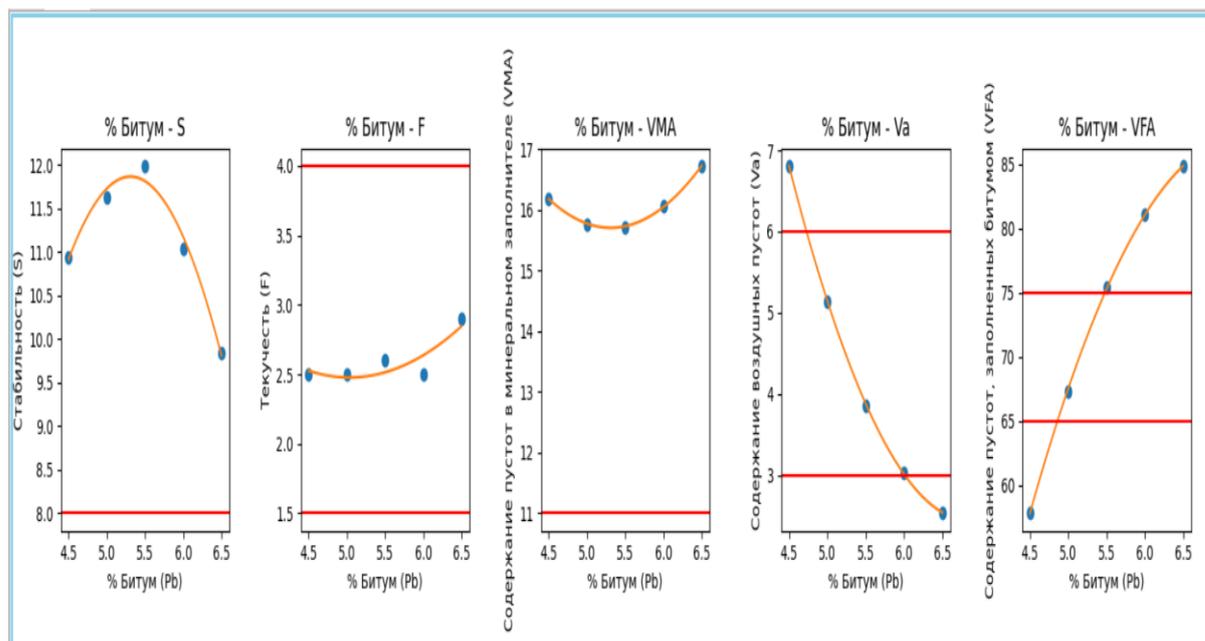
После расчёта показателей асфальтобетонной смеси программа автоматически строит основные графики зависимостей (Рис. 6 б):

- Стабильность Маршалла (S) от содержания битума;
- Текучесть Маршалла (F) от содержания битума;
- Содержание пустот в минеральном заполнителе (VMA) от содержания битума;
- Содержание воздушных пустот (V_a) от содержания битума;
- Содержание пустот, заполненных битумом (VFA) от содержания битума.

Из графиков легко определить оптимальное количество битума. В данном примере оптимальное количество битума составляет 5,2%.

ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ В ЛАБОРАТОРИИ							
	Щебень 1	Щебень 2	Щебень 3	Песок	МП	Битум	Код асфальтобетонной смеси
Насыпная плотность (G _i)	2.761	2.71	2.652	2.562	2.81	1.031	BTNC19
Истинная плотность (G ₁)	2.792	2.8	2.698	2.61	2.81		Лаборант
Процент % (P _i)	25.03	12.43	44.44	12.78	5.32		Le Van A
Название образца	BTNC19_4.5	BTNC19_5	BTNC19_5.5	BTNC19_6	BTNC19_6.5		Дата испытания
% Битум (P _b)	4.5	5	5.5	6	6.5		22/05/2024
Максимальная плотность АБС (G _{mm})	2.526	2.507	2.488	2.47	2.451		
Объемная плотность асфальтобетона (G _{mb})	2.354	2.378	2.392	2.395	2.389		
Стабильность (S)	10.94	11.63	11.99	11.04	9.85		
Текучесть (F)	2.5	2.5	2.6	2.5	2.9		Оптимальное количество битума
Общая объемная плотность заполнителя (G _{sb})	2.682	2.682	2.682	2.682	2.682		5.2
Общая истинная плотность заполнителя (G _{sa})	2.727	2.727	2.727	2.727	2.727		
Эффективная плотность заполнителя (G _{se})	2.711	2.711	2.711	2.712	2.711		
Содержание абсорбированного вяжущего (P _{ba})	0.411	0.411	0.411	0.425	0.411		
Содержание эффективного вяжущего (P _{be})	4.107	4.61	5.112	5.6	6.116		
Содержание пустот в минеральном заполнителе (VMA)	16.179	15.768	15.718	16.059	16.715		
Содержание воздушных пустот (V _a)	6.809	5.146	3.859	3.036	2.53		
Содержание пустот, заполненных битумом (VFA)	57.915	67.364	75.449	81.095	84.864		

а)



б)

Рис. 6. – Интерфейс окна испытания образцов асфальтобетонной смеси

а) Основные показатели асфальтобетонной смеси

б) Основные графики зависимостей

Выводы

Система автоматического подбора состава асфальтобетонных смесей разработана для оптимизации процесса подбора состава асфальтобетонных смесей, предоставляя инженерам и дорожным специалистам мощный инструментальный. Эта система позволяет собирать и анализировать огромное количество данных о различных компонентах асфальтобетонной смеси, включая типы и свойства используемых материалов, условия окружающей среды, требования к дорожному покрытию и другие факторы. На основе этих данных система автоматического подбора состава может рассчитать оптимальный состав смеси для конкретных условий и требований, учитывая при этом различные технические и экономические ограничения. Преимущества такой системы включают повышенную точность и надёжность, сокращение времени и затрат на процесс подбора состава асфальтобетонной смеси, а также возможность проведения тестирования и

анализа различных вариантов состава смеси. Это позволяет сократить количество расчётов и на самом деле улучшить качество и долговечность дорожных покрытий.

Литературы

1. Николенко М.А., Бессчетнов М.А. Повышение длительной трещиностойкости асфальтобетона дорожных покрытий // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856.

2. Суворов Д. Н., Илюхин А. В., Нгуен С. В., Зыонг Д. Т. Сравнение методов прогнозирования для решения задач управления стабильностью // Инженерный вестник Дона, 2023, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8768.

3. Котлярский Э. В., Кочнев В. И., Давлятова Д. Ю. Блок учета характеристик исходных материалов при автоматизированном проектировании асфальтобетонных смесей // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухов. 2013. № 6. С. 33-38.

4. Котлярский Э.В. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона. М., 2004. 193 с.

5. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Котлярский Э.В., Доценко А.И., Попов В.П. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Книга 2. Практические разработки. М.: РИА, 2009. 608 с.

6. TCVN 8820:2011. Стандартная практика проектирования асфальтобетонных смесей с использованием метода Маршалла. Ханой, 2011. 40 с.

7. Кирюхин Г.Н. Проектирование состава асфальтобетона и методы его испытаний. М., 2005. 70 с.

8. Фам Дуй Хуу Асфальтобетон. Ханой, 2008. 166 с.

9. John Wolberg, Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments, 2006. 263 p.

10. Luciano Ramalho, Fluent Python, 2015. 768 p.

11. Суворов Д. Н., Нгуен С. В. Программа подбора состава асфальтобетонной смеси, № 2024663882 // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет». 2024.

References

1. Nikolenko M.A., Besschetnov M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/856.

2. Suvorov D. N., Ilyuhin A. V., Nguen S. V., Zyong D. T. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8768.

3. Kotlyarskij E. V., Kochnev V. I., Davlyatova D. YU. Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. SHuhov. 2013. № 6. pp. 33-38.

4. Kotlyarskij E.V. Stroitel'no-tekhnicheskie svoystva dorozhnogo asfal'tovogo betona [Construction and technical properties of road asphalt concrete]. M., 2004. 193 p.

5. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Kotljarskij Je.V., Docenko A.I., Popov V.P. Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizacii proizvodstva asfal'tobetonnoj smesi [Computer modeling in the automation of asphalt concrete mixture production. Book 2. Practical developments]. Kniga 2. Prakticheskie razrabotki. M.: RIA, 2009. 608 p.

6. TCVN 8820:2011. Standartnaya praktika proektirovaniya asfal'tobetonnyh smesey s ispol'zovaniem metoda Marshalla [Standard Practice for Designing Asphalt Mixtures Using the Marshall Method]. Hanoi, 2011. 40 p.

7. Kiryuhin G.N. Proektirovanie sostava asfal'tobetona i metody ego ispytaniy [Design of asphalt concrete composition and testing methods]. M., 2005. 70 p.



8. Fam Duj Huu Asfal'tobeton [Asphalt concrete]. Hanoi, 2008. 166 p.
9. John Wolberg, Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments, 2006. 263 p.
10. Luciano Ramalho, Fluent Python, 2015. 768 p.
11. Suvorov D. N., Nguen S. V. Programma podbora sostava asfal'tobetonnoj smesi, № 2024663882 [Program for selection of asphalt mixture composition]. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Moskovskij avtomobil'no-dorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». 2024.

Дата поступления: 22.06.2024

Дата публикации: 8.07.2024