

Методологии подборов составов композитных материалов в дорожном строительстве

А.Н. Войтих¹, К.Ю. Тюрюханов^{1,2}

¹ Научно-исследовательский центр «Газпромнефть - Битумные материалы», Санкт-Петербург

² Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова, Пермь

Аннотация: Статья посвящена научно-методическим основам разработки составов композиционных материалов, специально предназначенных для значительного улучшения физико-механических свойств оснований и покрытий дорожной одежды автомобильных дорог, различных изделий и конструкций. Подробно раскрываются фундаментальные принципы, лежащие в основе создания оптимальной структуры композитных материалов, что способствует существенному повышению прочности, надежности и увеличению длительности эксплуатации конструкций. Кроме того, приводится анализ современных методик оптимизации состава композитов, особое внимание уделено важности учета специфики межфазных взаимодействий между компонентами и особенностям распределения частиц наполнителей внутри матрицы. Описаны практические подходы и приведены примеры успешного применения принципов и потенциал полученных решений. Отдельно отмечается ключевая роль математического моделирования и экспериментов, которые являются неотъемлемой частью эффективного подбора рецептур и оптимизации свойств композитов. Основные положения всех рассматриваемых методов сводятся к грамотному выбору качественных исходных материалов, правильному определению оптимального гранулометрического состава минеральных составляющих смесей, точного расчета необходимого количества связующих веществ, а также строгому контролю соответствия проектируемых характеристик запланированным показателям, что гарантирует получение высококачественных и надежных оснований и покрытий дорожной одежды автомобильных дорог, изделий и конструкций.

Ключевые слова: строительные композиты, состав, проектирование, разработка, технология, моделирование, управление свойствами, оптимизация, дорожная одежда

Введение

Разработка методик подбора рецептур композитных материалов (искусственно созданные материалы, состоящие из двух или более разнородных компонентов, каждый из которых сохраняет свою индивидуальность даже после объединения, которые работают совместно, создавая материал с улучшенными свойствами [1-3]. То есть композиты - искусственные материалы, состоящие из разных компонентов, объединенных для улучшения характеристик конечного материала.) основана на принципах двух важнейших дисциплин общего инженерного цикла:

«материаловедение», исследующее взаимозависимость механических, физических и химических качеств материалов от особенностей их состава, структуры и фазового состояния, и «наука о технологиях производства», разрабатывающая методы эффективного регулирования параметров производственных процессов для достижения оптимального качества готовой продукции, обладающей необходимыми прочностными и функциональными показателями, способствующими надежной работе изделий в условиях реального эксплуатационного окружения [4]. Подбор рационального состава современных многокомпонентных материалов, соответствующего ряду критериев необходимого качества, обуславливает необходимость осуществления многочисленных опытно-экспериментальных работ, что делает процесс трудоемким и недостаточно эффективным в условиях жестко регламентированных сроков, большом числе управляемых параметров и строгих граничных условий, следовательно, наиболее перспективным направлением являются методы математического моделирования и оптимизации [5]. Практическая реализация аналитических методов при математическом моделировании сводится к замене реального объекта или процесса его адекватным описанием реальных объектов или процессов на «языке» уравнений или других математических средств [5-6].

Процесс изучения и проектирования композитов разделяется на два ключевых этапа [2,4], характеризующихся различными методологическими подходами и уровнем проработанности прикладных аспектов изготовления составов (рисунок 1). Генерация оригинальных и новаторских решений и расширение массива знаний вызывают периодическое возобновление процессов зарождения и становления прогрессивных технологических направлений.

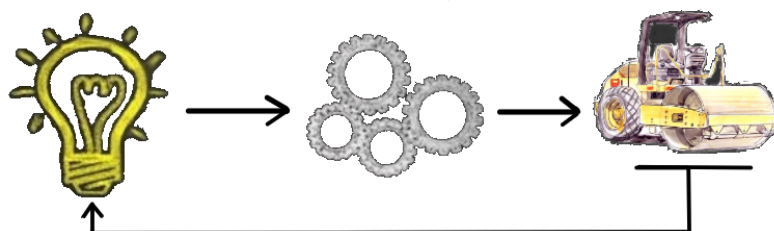


Рис. 1 – Периодическое возобновление процессов зарождения и становления прогрессивных технологических направлений

Зарождение новой технологии заключается в систематизации начальных данных, приобретении производственного опыта и формировании профессиональных навыков, связанных с новым материалом. Основополагающим подходом в технологическом процессе выступает традиционный рецептурный подход, исследования проводятся посредством метода последовательных проверок гипотез («проб и ошибок»), контроль над ходом технологического процесса обладает выраженным интуитивным характером, связанным с личным опытом специалиста-технолога. Становление новой технологии базируется на консолидации существующих информационных массивов, обнаружении регулярных связей между воздействием разных факторов и качественными показателями материала, исследования выполняются с опорой на современные достижения фундаментальной науки.

Оптимизация рецептуры и проектирование композитных материалов по мнению авторов [1,3] основаны на следовании трем основным правилам их архитектурного построения:

1. Контроль качества и количества связей между структурными элементами твердых тел базируется на следующей закономерности: возрастание числа и прочности создаваемых связей в единице объема

материала ведет к увеличению его устойчивости к действию внешних механических факторов. Однако практика показывает, что образование связей в материале происходит неравномерно, многие из них не участвуют полноценно в процессе сопротивления деформации и разрушению. Причина такого явления кроется в эффектах концентрации и локализации внутренних напряжений, развивающихся в неоднородной структуре материала, что вызывает частичное перераспределение нагрузки, приводящее к преждевременному разрыву одних связей и не задействовании других.

2. Регулирование процесса формирования полей напряжений реализуется путем придания составу и структуре материала максимальной однородности. Принято считать, что чем больше однородность материала, то есть упорядоченность расположения его физико-химических связей, тем эффективнее происходит распределение действующих напряжений и усилий, обеспечивая максимальную вовлеченность всех связей в обеспечение необходимой прочности и жесткости материала при воздействии внешних нагрузок.

3. Управление ростом и миграцией дефектов соотносится с реалиями современного производства, где независимо от применяемых технологий невозможно избежать образования дефектов, именно темпы их дальнейшего распространения определяют основные критерии деградации и отказоустойчивость материала.

Кроме того, при составлении рецептур композитных материалов значительное внимание уделяют причинно-следственным отношениям, проявляющимся в местах контакта различных материалов, сила данных связей напрямую связана степенью сходства контактирующих материалов по кристаллографической микроструктуре, дисперсности частиц, минералогическому, химическому составу и коэффициенту теплового расширения [3].

Основная часть

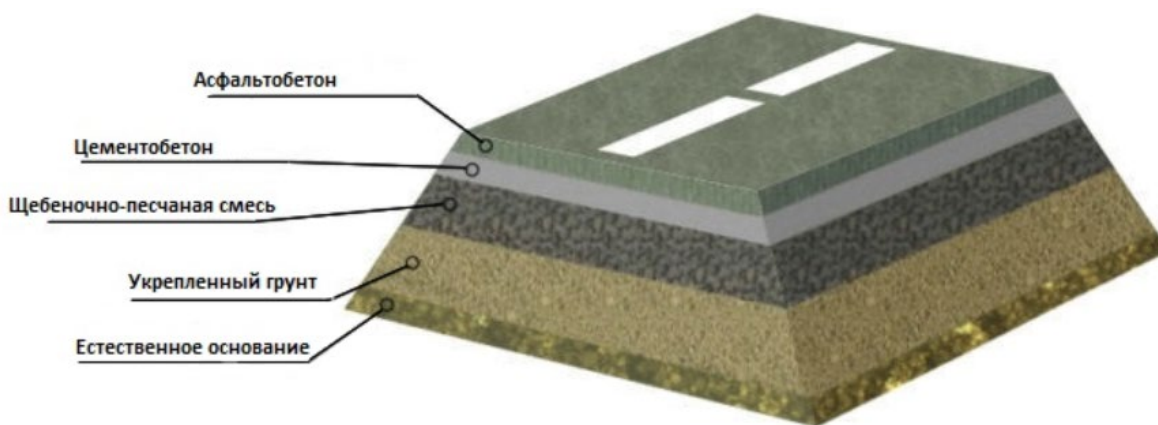


Рис. 2 – Пример конструкции (расположения слоев) дорожной одежды

При проектировании конструкций дорожных одежд (рисунок 2) инженеры и специалисты применяют два основных концептуально различных подхода [7]. Первый подход реализуется посредством расчетов, выполненных по установленным теоретико-эмпирическим закономерностям, сформулированным в виде формул или номограмм. Эти методы используются, например, в нормативных документах, таких как ГОСТ Р 71404-2024 и различных рекомендациях по проектированию дорожных одежд. Второй подход характеризуется использованием проверенных временем типовых конструктивных решений, разработанных на основании полевых испытаний и многолетнего опыта реальной эксплуатации автомобильных дорог. Подобная практика нашла широкое применение как в российском дорожном строительстве, так и за рубежом. Принцип проектирования дорожных одежд включает соблюдение установленных норм долговечности покрытия и опору на передовую практику отечественного и международного уровня, касающуюся оптимального подбора дорожно-строительных материалов и учета местных природных и инженерных условий территории [8-10]. На рисунке 3 изображены основные принципы конструирования и расчета долговечных дорожных одежд.



Рис. 3 – Основные принципы конструирования и расчета дорожных одежд

Из-за значительной неопределенности и трудности адекватного прогнозирования комплексного взаимодействия различных факторов разработка обобщенной математической модели оказывается непростой задачей. Соответственно, выполнение расчетов конструктивных элементов дорожного полотна исключительно средствами классической теории упругости невозможно ввиду недостаточной точности такого подхода. Современная практика проектирования ориентирована преимущественно на использование комбинированных методов — полуэмпирических подходов, объединяющих численные решения уравнений теории упругости с экспериментально обоснованными закономерностями, характеризующими

связь действующих нагрузок с напряжением и деформацией материала. Важнейшей особенностью проектирования дорожных одежд становится необходимость назначения критериев значений эксплуатационных показателей именно на конечный срок расчетной долговечности конструкции [11].

Проектирование составов композитных материалов является ключевым этапом в строительстве дорог, аэродромов, мостовых сооружений и прочих объектов транспортной инфраструктуры. Правильный подбор компонентов материалов влияет на эксплуатационные характеристики покрытия и основания: прочность, долговечность, устойчивость к воздействию окружающей среды и транспортных нагрузок. Выбор оптимального состава зависит от множества факторов: климатических условий региона строительства, интенсивности движения транспорта, характеристик исходных материалов и требований нормативных документов. Грамотное проектирование позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию, повысить качество работ и обеспечить безопасность объекта. Таким образом, разработка рецептуры современных строительных композиций играет важную роль в обеспечении надежности и долговечности дорожных конструкций.

Укрепленные грунты

Подход, предусматривающий использование в конструктивных слоях дорожного полотна предварительно подготовленных и укрепленных грунтов взамен традиционно используемых прочных каменных материалов, представляет собой высокоэффективное решение, способствующее ощутимому сокращению совокупных затрат на проектирование, строительство, переустройство и выполнение капитального ремонта автомобильных дорог, аэродромов и объектов инфраструктуры [12]. Прочность грунтов, усиленных вяжущими, детерминируется двумя

фундаментальными параметрами механического сопротивления: коэффициентом сцепления и углом внутреннего трения. Коэффициент сцепления непосредственно обусловлен эффективностью взаимосвязей минеральных элементов грунта, характеристикой механических свойств применяемого вяжущего и устойчивостью формируемых структурных соединений — внутриагрегатных и межагрегатных, а также зависимостью от явлений адгезии и когезии. Угол внутреннего трения, характеризующий способность грунта противостоять сдвиговым нагрузкам, находится в зависимости от первоначального гранулометрического состава, формы зерен, уровня уплотненности структуры, наличия свободной влаги и количественного соотношения добавляемого вяжущего вещества [13-14].



Рис. 4 – Алгоритм теоретико-эмпирического подбора составов смесей

Методология выбора оптимального состава укрепленных грунтов (смесей) основывается на предварительном расчете количества вяжущего

компонента согласно справочным данным (руководящих документов), подлежащему последующей коррекции исходя из результатов оценки качественных показателей полученной смеси [12]. В исследовании [13] подтверждена эффективность метода полного факторного планирования эксперимента, предлагаемый подход позволил существенно сократить объем экспериментальных исследований, одновременно создав условия для построения адекватных математических моделей исследуемых процессов. Анализ полученных моделей выявил ключевые факторы, влияющие на показатели прочности, определил характер их взаимодействия и установил оптимальный расход вяжущего компонента для достижения максимальной эффективности обработки грунтов. Подход к проектированию смесей по методу теоретико-эмпирическим закономерностям подробно описан в работе [15] и представлен его алгоритм на рисунке 4.

Щебеночно-гравийно-песчаные смеси

Оптимальная рецептура щебеночно-гравийно-песчаных композиций для заданных эксплуатационных условий определяется экспериментальным путем, моделированием или посредством полевых обследований высокопрочных (без дефектов после эксплуатации) дорожных участков с последующим изучением гранулометрической структуры грунтов и смесей из покрытий и оснований, лабораторного тестирования механических характеристик аналогичных составов и теоретического моделирования фракционного распределения компонентов [16], обеспечивающего максимальную плотность и минимальную пористость, способствующих максимизации внутреннего сопротивления сдвиговым деформациям. Прочностные характеристики конструктивных слоев из щебеночно-песчаных смесей существенно зависят от доли щебня. При содержании щебня менее 30–40% прочность определяется свойствами мелкодисперсного компонента, а крупные фракции играют роль заполнителя. Увеличение содержания щебня

способствует формированию контактной структуры, эффективно воспринимающей нагрузки. Оптимальное содержание крупного обломочного материала составляет 65–70% [17–18]. Максимально плотная упаковка материала обеспечивается при достаточном количестве мелкодисперсных частиц для заполнения пустот между крупными фрагментами. Избыток мелкодисперсных частиц снижает устойчивость покрытия к транспортным нагрузкам и увеличивает риск разрушения конструкции. Выделяют две фундаментальные методологии формирования математической модели структуры сыпучего материала: феноменологическую, ориентированную на изучение поведения всей совокупности частиц как единого макромасштабного объекта, и микроструктурную, акцентирующую внимание на характеристиках отдельных частиц. Помимо этого, одной из ключевых проблем остается определение адекватной геометрической модели форм частиц исследуемого материала [16–17].

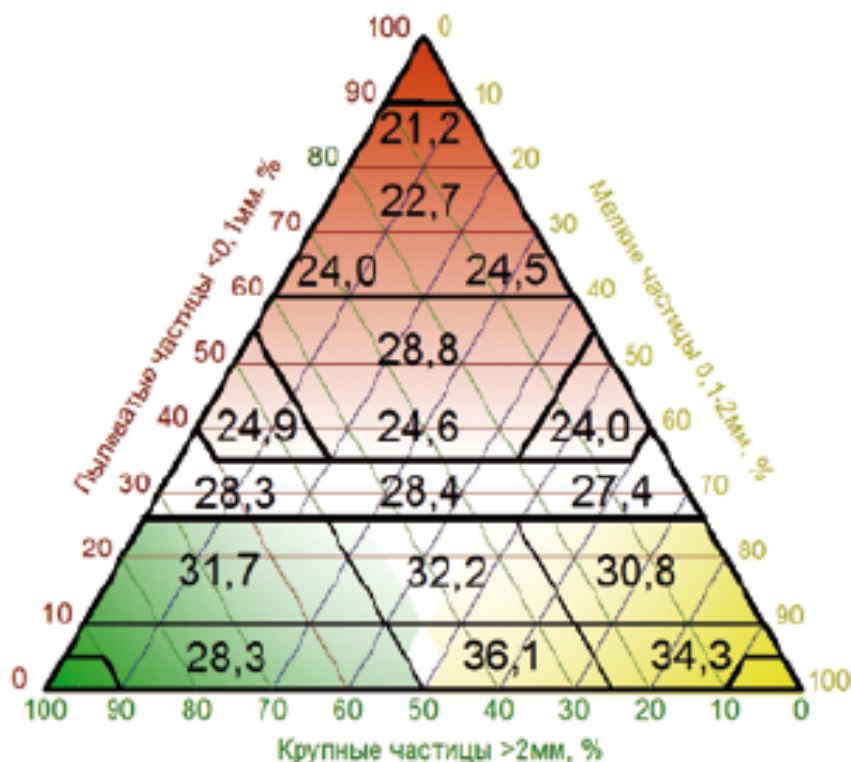


Рис. 5 – Номограмма зависимости модуля деформации (МПа) от гранулометрического состава ЩГПС при равнозначных толщинах слоя [18]

В работе [19] подробно описан метод подбора плотной двухкомпонентной смеси графическим методом секущих плоскостей, который сводится к построению стандартных графиков предельных кривых рассева. Исследования [18] демонстрируют номограммы зависимостей между: плотностью, модулем общей деформации и угла внутреннего трения в песчаных грунтах различной гранулометрии, что позволяет ориентировочно находить коррелирующие переменные (значения) по зерновому составу (рисунок 5).

Асфальтобетон

Процесс моделирования дорожной одежды служит отправной точкой проектирования. Целями моделирования являются оценка устойчивости дорожной конструкции к различным видам механических воздействий и неблагоприятных природных факторов.

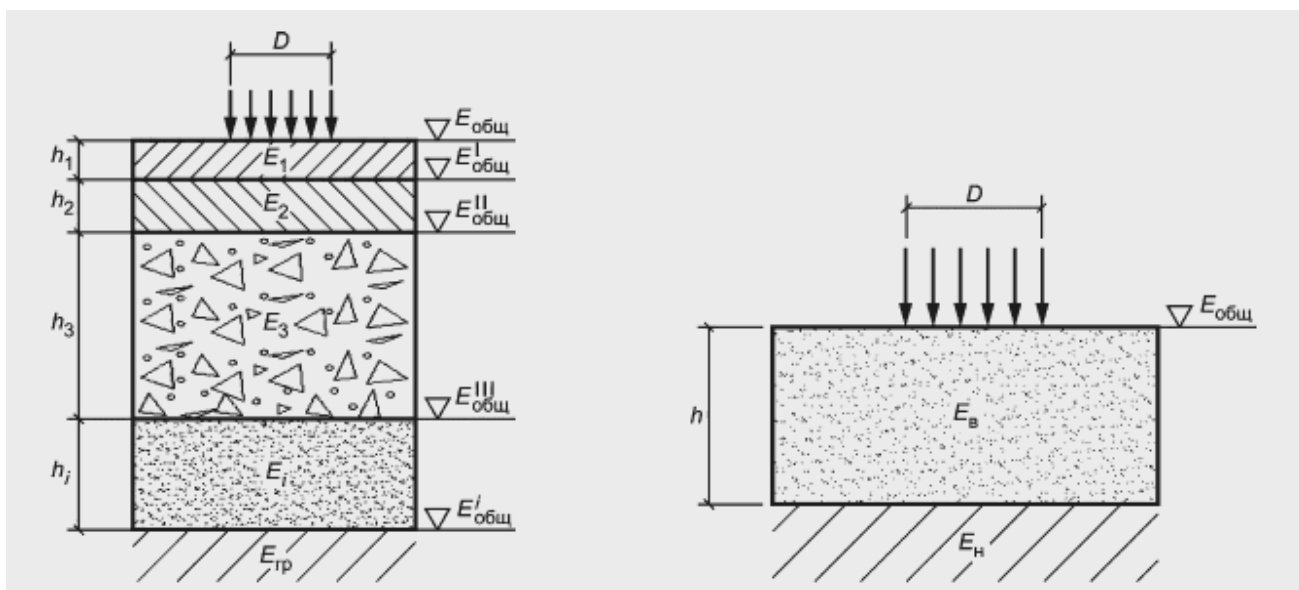


Рис. 6 – Принципиальные схемы расчета общего модуля упругости дорожной одежды

h – верхний слой конечной толщины; h_1, h_2, h_3, h_i – толщина слоев; $E_{общ}$ – общий модуль упругости дорожной одежды; $E_{общ}$ – модуль упругости на поверхности верхнего слоя; $E'_{общ}, E''_{общ}, E'''_{общ}, E^i_{общ}$ – общие модули упругости на поверхности слоев; $E_б$ – модуль упругости верхнего слоя; $E_н$ – модуль упругости упругого полупространства, не ограниченного снизу (нижнего слоя); E_1, E_2, E_3, E_i – модули упругости материалов слоев; $E_{гр}$ – модуль упругости грунта рабочего слоя

(ГОСТ Р 71404-2024 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования)

В рамках моделей учитываются многочисленные входные параметры, такие как геометрическая структура слоя покрытия, физические и химические свойства применяемых материалов, показатели упругих деформаций (рисунок 6), степень увлажнения, транспортные потоки и динамика их перемещения, интенсивность и характер нагружения поверхности дорог, область соприкосновения колес автомобилей с покрытием, длительность эксплуатации и прочие значимые факторы. Благодаря использованию результатов моделирования выделяются наиболее уязвимые участки дорожной конструкции, испытывающие максимальное разрушительное воздействие, что позволяет определить необходимые критерии прочности и эксплуатационной надежности конструкции в целом [20]. Источник [21] акцентирует внимание на том, что конструкционные и функциональные особенности асфальтобетонных композиций предопределяются, прежде всего, качествами образующей их матричной системы, состоящей из органических вяжущих веществ и тонкодисперсных минеральных наполнителей. Для достижения устойчивого баланса свойств асфальтобетона и формирования требуемой внутренней структуры необходимо соблюдать оптимальное соотношение величин отдельных уровней организации структуры — микро-, мезо- и макроструктуры. Основные принципы такого подхода включают проектирование стойкого пространственного каркаса, разработку вязкоупругого компонента с высокой степенью адгезионно-когезионных качеств и сокращение доли свободных пор в готовом материале до минимума. Степень адгезионно-когезионного сцепления в асфальтобетонах осуществляют органические вяжущие вещества распределяющиеся тонкими слоями (образуя пленки) различной толщины, которые структурируются на поверхностях минеральных составляющих смеси. Эти пленки подвергаются изменениям под действием влияния окружающей среды (старение), происходит изменение физико-механических

свойств битумов, как правило в худшую сторону. Поэтому при проектировании асфальтобетонов необходимо учитывать данный факт [22]. Особенности подборов составов асфальтобетонных смесей по критериям гранулометрического состава и плотности подробно описаны в [23-24], и сводятся к трем методам: экспериментальная методика подбора уплотненных композиций, основанная на последовательном замещении компонентов смеси друг другом с целью достижения оптимальной плотности структуры материала; метод определения рационального гранулометрического состава смеси посредством подбора фракции, близкой к математически вычисленным оптимальным («эталонным») кривым распределений размеров частиц, направленный на достижение максимального уровня плотности и стабильности композита (рисунок 7); методология разработки смесей, базирующаяся на внедрении устойчивых типовых решений, включающих строго регламентированные пропорции известных и испытанных видов сырья, подтвердивших свою технологичность и пригодность для реализации поставленных инженерных целей [9,20-21].

Принято считать, что оптимальные составы характеризуются минеральными смесями, в которых размер частиц (d) последовательно сокращается вдвое, тогда как массы соответствующих фракций уменьшаются примерно в диапазоне от 0,65 до 0,9 раза. Показатель, отражающий соотношение количеств смежных фракций, носит название коэффициента сбега (k) [10,24].

Соотношение размеров частиц (d) выражается следующим образом:

$$d_2 = \frac{d_1}{2}; d_3 = \frac{d_1}{2^2}; \dots; d_n = \frac{d_1}{2^{n-1}},$$

где d_1 – размер наибольшего отверстия сита, мм; d_n – то же наименьшего отверстия сита, мм; d_2, d_3, \dots – то же промежуточных отверстий сит, мм [10,24].

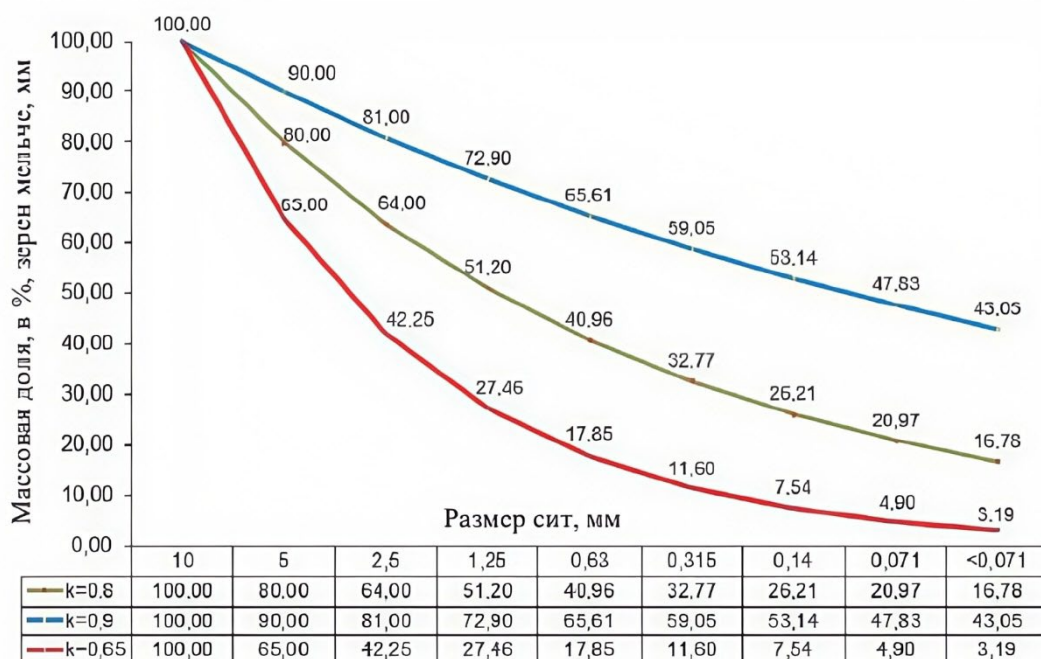


Рис. 7 – Аналитические кривые зернового состава смеси фракций минерального материала с различными значениями коэффициента сбег [24]

Значение коэффициента сбег (k), показывающего изменение массы каждой последующей фракции относительно предыдущей, вычисляется согласно следующему соотношению:

$$k = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_3}{x_2} = \dots = \frac{x_n}{x_{n-1}},$$

где x_1 – содержание наибольшей фракции зерен в смеси, %; x_n – то же наименьшей фракции зерен в смеси, %; x_2, x_3, \dots – то же промежуточных фракции зерен в смеси, % [10,24].

Цементобетон

Разработка оптимальной композиции цементобетонных составов является приоритетной задачей при проектировании конструктивных элементов различного функционального предназначения и эксплуатационных режимов. Изготовленные изделия и конструкции из бетона должны характеризоваться высокой прочностью, продолжительным сроком службы, дополнительно обеспечивая требуемые уровни морозостойчивости, водонепроницаемости, химической устойчивости к

неблагоприятным внешним факторам и эффективностью затрат. Проектирование составов состоит из двух этапов: расчетно-экспериментального подбора теоретического состава и адаптации лабораторных решений к условиям промышленного производства. Лабораторный состав призван устанавливать точное количество каждого ингредиента или определять рациональное отношение всех компонентов к объему вносимого цемента, тогда как производственная стадия нацелена на точный расчет объема выпускаемой бетонной смеси с обязательным учетом реальной влажности зернистых заполнителей [25-27]. Процесс выбора оптимального соотношения материалов при конструировании бетонной смеси должен гарантировать достижение необходимой структурной прочности готовой конструкции, учитывая технологию изготовления, требуемую удобоукладываемость и подвижность раствора при минимальных затратах вяжущих веществ. Показатели качественных характеристик бетона, такие как прочность, деформативность, трещиностойкость и срок службы бетона, обусловлены его пористостью, качеством сцепления в зоне контакта цементного камня с заполнителем и характеристиками самого заполнителя. Следовательно, требуемое качество бетона достигается путем целенаправленного регулирования рецептуры и технологических операций [28]. Оптимизацией задач подборов составов цементобетонов занимались в работах [26,29], и пришли к выводу, что существует два основных способа решения задачи: графический (номограммы) и аналитический.

Бетон, представляющий собой многофазную систему, принадлежит классу сложных объектов, отличающихся большим числом связанных друг с другом параметров. Основная задача анализа таких систем состоит в идентификации зависимостей между исходными факторами и конечными показателями эффективности, а также в определении тех значений факторов, которые обеспечивают максимальное улучшение целевых характеристик

системы. В ситуациях ограниченной информированности о механизме физических и химических процессов (например, характерных для структуры бетона), проблемы идентификации зависимостей и оптимизации условий синтеза или компонентного состава сложной системы успешно разрешаются методами экспериментальной статистики [30]. Эффективный алгоритм расчета оптимальной гранулометрической характеристики заполнителя, основанный на автоматизированном подборе композиций из разнородных фракционированных частиц, детально изложен в исследовании [27].

Заключение

Проведен всесторонний анализ существующих методик подбора составов различных видов строительных композитных материалов, включая укрепленные грунты, щебеночно-гравийно-песчаные смеси, асфальтобетоны и цементобетоны. Рассмотрены традиционные подходы, такие как эмпирический и расчетный методы, а также современные компьютерные технологии оптимизации рецептур. Выделены преимущества и недостатки каждой методики, рассмотрены критерии выбора оптимальных решений применительно к различным условиям эксплуатации конструкций и сооружений. Подчеркнута необходимость учета климатических факторов, особенностей региона строительства и требований нормативных документов. Сделан вывод о перспективности внедрения инновационных методов расчета и подбора рецептур с использованием численного моделирования и машинного обучения, позволяющих повысить качество и долговечность строящихся объектов.

Литература

1. Макеев А. И. Методологические основы теории конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных композитов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-

строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2015. – №. 1. – С. 29-37.

2. Гаркина И. А., Данилов А. М., Королев Е. В. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм // Строительные материалы. — 2018. — № 1-2. — С. 60-62.

3. Лесовик В. С. и др. Сродство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего // Строительные материалы. – 2015. – № 9. – С. 18–22.

4. Чернышов Е. М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научных знаний и предмет развития исследований. Часть 1. Постановка проблемы и ее суть // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – №. 12. – С. 41-51.

5. Харитонов А. М. Развитие методов оптимизации составов многокомпонентных строительных композитов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-3. – С. 520–523.

6. Гаркина И. А., Данилов А. М., Королев Е. В. Краткий обзор аналитических методов синтеза сложных систем // Региональная архитектура и строительство. — 2018. — № 4. — С. 48–54.

7. Ушаков В. В. Совершенствование нормативной базы проектирования дорожных одежд // Дорожная держава. — 2023. — № 116. — С. 27–29.

8. Углова Е. В., Шило О. А. Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока // Транспортные сооружения. — 2018. — Т. 5. — № 3. — С. 13-13.

9. Братчун В. И., Бородай Д. И., Радюкова Э. Л. [и др.]. Объемно-функциональное проектирование дорожных асфальтобетонных смесей / –// Строитель Донбасса. – 2024. – Выпуск 2-2024. – С. 39-43. – ISSN 2617-1848.

10. Кирюхин Г. Н. Способы структурного регулирования минеральной части асфальтобетона // Дороги и мосты. — 2015. — № 1. — С. 297–319.

11. Жуковский Е. М. Аналитический обзор методов проектирования нежестких дорожных одежд для оценки их эффективности в современной практике // Вестник гражданских инженеров. — 2023. — № 6. — С. 101.

12. Лофлер М., Слободчикова Н. А. Методика подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2018. — Т. 8. — №. 2 (25). — С. 141-147.

13. Фёдоров С. А. Использование метода планирования эксперимента при определении прочностных характеристик укрепленных засоленных грунтов // Инженерный вестник Дона. — 2024. — № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9297

14. Урханова Л. А. и др. Подбор состава укрепленных материалов для оснований автомобильных дорог с использованием золошлаковых смесей // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. — 2023. — №. 4 (91). — С. 96-105.

15. Бобыльская В. А., Мазгалева А. В., Лещенко С. И. Подбор составов золошлакоцементной смеси при проектировании грунтобетонов // Эксперт: теория и практика. — 2023. — № 4 (23). — С. 41–46.

16. Шабаев С. Н. Некоторые вопросы решения задачи о проектировании смеси оптимального зернового состава // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2005. — № 4.1. — С. 82–84.

17. Шаламанов В. А., Афиногенов О. П., Шабаев С. Н. Предпосылки разработки методики проектирования зернового состава щебеночно-песчаных смесей для устройства покрытий и оснований карьерных дорог //

Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2006. — № 4. — С. 48–53.

18. Мирный А. Ю., Тер-Мартirosян А. З. Подбор гранулометрического состава песчано-гравийных смесей для песчаных подушек и насыпей // Жилищное строительство. — 2014. — № 9. — С. 43–46.

19. Михайлова А. А., Цупикова Л. С. Графический метод корректировки зернового состава щебёночно-гравийно-песчаных смесей для покрытий и оснований автомобильных дорог // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. — 2020. — С. 321–324.

20. Корочкин А. В. Проектирование дорожных одежд в США на автомобильных дорогах высоких категорий // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте». Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2021. С. 176–190.

21. Братчун В. И., Беспалов В. Л. Теоретико-методологические положения формирования оптимальных структур комплексно-модифицированных дорожных асфальтобетонов повышенной долговечности // Строитель Донбасса. — 2018. — № 1. — С. 17–23.

22. Веюков Е. В. и др. Проектирование дорожных одежд с учетом процессов старения асфальтобетонов // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 4. — С. 191–195.

23. Арус Н. Н., Горячев М. Г. Обзор и анализ методов проектирования нежестких дорожных оснований для оценки их эффективности в современной международной практике // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. = Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. — 2021. — №. 3 (29). — С. 2.

24. Афанасенко А. А. Оптимизация зернового состава асфальтобетонных смесей с целью обеспечения максимальной плотности // Наука и техника. – 2024. – Т. 23. – №. 3. – С. 235-241.

25. Голова Т. А., Зотов Л. Д. Подбор состава бетонной смеси как основа формирования эффективных строительных конструкций // Актуальные вопросы современной науки и практики. — 2019. — С. 35–41.

26. Степанова М. П., Белькова Н. А., Баранов Е. В. Оптимизация состава бетона для основания и покрытия дорог // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2023. — № 1 (54). — С. 83–89.

27. Белов В. В., Образцов И. В., Куляев П. В. Методология проектирования оптимальных структур цементных бетонов // Строительные материалы. — 2013. — № 3. — С. 17–21.

28. Несветаев Г. В., Корянова Ю. И., Иванчук Е. В. Проектирование состава бетона на соответствие нескольким показателям качества // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2021. – №. 6. – С. 191-195.

29. Борисюк Е. А., Прусакова М. Ю. Моделирование составов мелкозернистого бетона // Перспективы науки. — 2018. — С. 31.

30. Шаламанов В. А., Афиногенов О. П., Шабает С. Н. Предпосылки разработки методики проектирования зернового состава щебеночно-песчаных смесей для устройства покрытий и оснований карьерных дорог // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2006. — № 4. — С. 48–53.

References

1. Makeev A. I. Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya. 2015. №. 1. pp. 29-37.

2. Garkina I. A., Danilov A. M., Korolev E. V. Stroitel'nye materialy. 2018. № 1-2. pp. 60-62.
 3. Lesovik V. S. i dr. Stroitel'nye materialy. 2015. № 9. pp. 18–22.
 4. Chernyshov E. M. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo. 2018. №. 12. pp. 41-51.
 5. Kharitonov A. M. Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 11-3. pp. 520–523.
 6. Garkina I. A., Danilov A. M., Korolev E. V. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2018. № 4. pp. 48–54.
 7. Ushakov V. V. Dorozhnaya derzhava. 2023. № 116. pp. 27–29.
 8. Uglova E. V., Shilo O. A. Transportnye sooruzheniya. 2018. T. 5. № 3. pp. 13-13.
 9. Bratchun V. I., Borodaj D. I., Radyukova E.H.L. [i dr.]. Stroitel' Donbassa. 2024. Vypusk 2-2024. pp. 39-43. ISSN 2617-1848.
 10. Kiryukhin G. N. Dorogi i mosty. 2015. № 1. pp. 297–319.
 11. Zhukovskij E. M. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2023. № 6. pp. 101.
 12. Lofler M., Slobodchikova N. A. Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2018. T. 8. №. 2 (25). pp. 141-147.
 13. Fyodorov S. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2024/9297
 14. Urkhanova L. A. i dr. Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologij i upravleniya. 2023. №. 4 (91). pp. 96-105.
 15. Bobyl'skaya V. A., Mazgaleva A. V., Leshchenko S. I. Ehkspert: teoriya i praktika. 2023. № 4 (23). pp. 41–46.
 16. Shabaev S. N. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. № 4.1. pp. 82–84.
-



17. Shalamanov V. A., Afinogenov O. P., Shabaev S. N. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. № 4. pp. 48–53.
18. Mirnyj A. YU., Ter-Martirosyan A. Z. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2014. № 9. pp. 43–46.
19. Mikhajlova A. A., Cupikova L. S. Dal'nij Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya. 2020. pp. 321-324.
20. Korochkin A. V. Materialy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Informacionnye tekhnologii i innovacii na transportE». Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2021. pp. 176-190.
21. Bratchun V. I., Bupalov V. L. Stroitel' Donbassa. 2018. № 1. pp. 17–23.
22. Veyukov E. V. i dr. Innovacii i investicii. 2022. № 4. pp. 191–195.
23. Arus N. N., Goryachev M. G. Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. = Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2021. №. 3 (29). pp. 2.
24. Afanasenko A. A. Nauka i tekhnika. 2024. T. 23. №. 3. pp. 235-241.
25. Golova T. A., Zotov L. D. Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki i praktiki. 2019. pp. 35–41.
26. Stepanova M. P., Bel'kova N. A., Baranov E. V. Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2023. № 1 (54). pp. 83–89.
27. Belov V. V., Obrazcov I. V., Kulyaev P. V. Stroitel'nye materialy. 2013. № 3. pp. 17–21.
28. Nesvetaev G. V., Koryanova YU. I., Ivanchuk E. V. Ehlektronnyj setевой politematicheskij zhurnal «Nauchnye trudy KuBGU». 2021. №. 6. pp. 191-195.
29. Borisyuk E. A., Prusakova M. YU. Perspektivy nauki. 2018. pp. 31.
30. Shalamanov V. A., Afinogenov O. P., Shabaev S. N. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. № 4. pp. 48–53.

Дата поступления: 1.11.2025

Дата публикации: 25.12.2025
