

## Список литературы

- 1 Прецизионные газовые подшипники / Ю. Я. Болдырев [и др.]. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 504 с.
- 2 **Kondratov, D. V.** Hydroelastic oscillations of three-layered channel wall resting on elastic foundation / D. V. Kondratov, V. S. Popov, A. A. Popova // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P. 903–911. – DOI : 10.1007/978-3-030-22041-9\_96.
- 3 **Крупенин, А. М.** Удар трехслойной пластины о свободную поверхность жидкости / А. М. Крупенин, М. И. Мартиросов, Л. Н. Рабинский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 5–2. – С. 65–73.
- 4 Viscous fluid-structure interaction response of composite hydrofoils / Liao, Y. [et al.] // Composite Structures. – 2019. – Vol. 212. – P. 571–585. – DOI : 10.1016/j.compstruct.2019.01.043.
- 5 **Mogilevich, L. I.** Hydroelastic response of a circular sandwich plate interacting with a liquid layer / L. I. Mogilevich, V. S. Popov, A. A. Popova // Journal of Physics : Conference Series. – 2020. – Vol. 1546. – P. 012–137.
- 6 **Черненко, А. В.** Математическое моделирование гидроупругих колебаний однослойных и трехслойных пластин, образующих стенки каналов с пульсирующей вязкой жидкостью, установленных на упругом основании: специальность 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : дис.... канд. физ.-мат. наук / А. В. Черненко. – Саратов, 2022. – 20 с.
- 7 **Попов, В. С.** Моделирование гидроупругих колебаний стенки канала, имеющей нелинейно-упругую опору / В. С. Попов, А. А. Попова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14, № 1. – С. 79–92.
- 8 **Горшков, А. Г.** Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – М. : Физматлит, 2005. – 576 с.
- 9 **Попов, В. С.** Динамика взаимодействия пульсирующего слоя вязкой сжимаемой жидкости с пластиной на нелинейно-упругом основании / В. С. Попов, А. А. Попова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2024. – № 3 (114). – С. 45–69.

УДК 691.32.05

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОДОБАВОК В БЕТОН КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*В. В. ШЕЛЮТО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В современном строительстве надежность и безопасность зданий и сооружений являются приоритетными задачами. Так, сегодня одним из наиболее перспективных направлений в области современных строительных материалов является использование нанодобавок в бетонных смесях. Нанотехнологии предлагают уникальные возможности для улучшения механических и физико-химических свойств бетона. Так, нанодобавки способны существенно повысить прочность, долговечность и устойчивость бетона к внешним воздействиям, что делает его более надежным и долговечным.

### *Структура традиционного бетона*

Структура классического бетона представляет собой сложную многокомпонентную систему, где взаимодействие различных элементов определяет его физико-механические свойства. Прежде всего следует отметить, что заполнители как мелкие, так и крупные играют ключевую роль в формировании прочности и долговечности бетона. Мелкие заполнители, такие как песок, способствуют уменьшению пустотности и повышению плотности, тогда как крупные заполнители, например гравий или щебень, могут влиять на прочность на сжатие за счет оптимизации распределения нагрузок.

Соотношение воды и цемента является одним из наиболее критичных параметров в технологии бетона. Снижение содержания воды при сохранении необходимой подвижности смеси ведет к увеличению прочности бетона. Это связано с тем, что избыточная вода может создавать капиллярные поры, которые негативно сказываются на механических характеристиках.

Также важным является процесс гидратации цемента, который зависит от условий окружающей среды, таких как температура и влажность. Оптимальные условия для гидратации способствуют формированию прочной микроструктуры, что, в свою очередь, влияет на конечные характеристики бетона.

### *Нанодобавки: определение и классификация*

Нанодобавки – это материалы, состоящие из структурных элементов (наночастиц), которые могут быть представлены в виде кластера диаметром 1–100 нм, включающего в себя от нескольких

десятков до нескольких тысяч атомов. Эти добавки могут значительно влиять на механические, физические и химические характеристики конечного продукта.

*Классификация нанодобавок.*

1 По происхождению: наноматериалы природного происхождения; синтетические наноматериалы.

2 По структуре: наночастицы (сферические или фибриллярные частицы); нанопленки; нанокompозиты (системы, состоящие из матрицы и добавленных наночастиц).

3 По функциональности: улучшение прочности (углеродные нанотрубки); устойчивость к коррозии (наночастицы оксидов металлов); улучшение теплоизоляции (аэрогели).

4 По типу взаимодействия с матрицей: распределенные нанодобавки; слоистые нанодобавки.

*Краткий обзор разработки технологии нанобетона*

В 1993 году в России был разработан высокотехнологичный материал – нанобетон, первооткрывателем которого стал ученый А. Пономарев из Санкт-Петербурга. С тех пор нанобетон зарекомендовал себя как эффективный строительный материал, завоевав популярность на рынке стран СНГ и за рубежом, а также прочно закрепился в современных строительных технологиях.

*Технология и состав нанобетона*

Нанобетон представляет собой модификацию традиционного бетона, в состав которого входят пластифицирующие вещества, способствующие улучшению его структуры. Эти добавки, известные как наноинициаторы, представляют собой крошечные трубки, состоящие из углеродных полимеров, которые взаимодействуют с молекулами бетона. Это взаимодействие приводит к снижению содержания воды в смеси и увеличению подвижности цементного раствора.

Состав нанобетона включает в себя минеральное вяжущее, заполнитель и воду, что позволяет добиться высокой прочности и долговечности материала.

*Физические и механические свойства*

Нанобетон демонстрирует выдающиеся физические и механические свойства. Он способен выдерживать температуры до 800 °С, а прочность материала может увеличиваться до 200 %. Устойчивость к холоду достигает 70 %, что делает его идеальным для использования в различных климатических условиях [1]. Кроме того, кислород, распределяющийся в наночастицах бетона, обладает бактерицидными свойствами, что делает материал безопасным для здоровья. Измененная структура нанобетона позволяет снизить вес изделий в 5 раз и минимизировать вероятность появления трещин. Высокая степень прочности также позволяет сократить объемы укладки на 35 %, что является значительным преимуществом для строительной отрасли.

*Область применения нанобетона*

В результате введения наночастиц в рядовые строительные материалы последние приобретают особые свойства, требуемые в строительстве высотных, большепролетных и специальных сооружений [2–5]. Так, наночастицы SiO<sub>2</sub> (нанокремнезем) можно использовать в составе высококачественного и самоуплотняющегося бетона для улучшения удобоукладываемости и прочности [2]. Размеры и удельная поверхность частиц, используемых в бетонных технологиях, отражают общую тенденцию применения все более тонкодисперсных материалов [2]. При помощи мельчайших частиц, таких как частицы микро-, а затем и нанокремнезема, за несколько десятилетий в технологии бетона были сделаны существенные достижения. Нановолокна являются еще одним перспективным компонентом для применения в бетоне.

*Повышение надежности зданий и сооружений при внедрении нанодобавок*

Внедрение нанодобавок в строительные материалы значительно повышает надежность зданий и сооружений. При введении в традиционный бетон углеродных нанотрубок можно достичь значительного повышения прочности бетона. Кроме того, нанотрубки позволяют улучшить распределение нагрузки и повысить устойчивость бетонного изделия к механическим повреждениям. Также при использовании наночастиц оксидов металлов отмечается значительное повышение прочностных характеристик. Благодаря нанодобавкам можно достичь улучшенной коррозионной стойкости, что особенно важно для конструкций, подверженных воздействию влаги и агрессивных сред. Наноматериалы могут улучшать устойчивость к температурным колебаниям, что делает конструкции более надежными в условиях резких изменений температуры. Благодаря использованию нанодобавок, за счет увеличения прочности можно достичь облегчения собственного веса конструкции и, как следствие, снизить материалоемкость изделий. Также следует отметить и повышение долговечности изделий, так как нанодобавки могут замедлять процессы старения и разрушения материалов, что ведет к увеличению срока службы зданий и сооружений. Например, добавление наноразмерных силикатов может улучшить водоотталкивающие свойства бетона.

Таким образом, нанобетон является значительным шагом вперед в сфере строительных материалов. Его уникальные характеристики и преимущества открывают новые возможности для использования в строительстве, обеспечивая высокую прочность и долговечность конструкций. Перспективы дальнейших исследований и разработок в этой области могут привести к еще более значительным достижениям в высоких технологиях строительства в Республике Беларусь.

#### Список литературы

- 1 Использование нанобетона в строительстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://xn----9sbmj2afc2a7h.xn-p1ai/about/articles/ispolzovanie-nanobetona-v-stroitelstve/>. – Дата доступа : 12.09.2024.
- 2 Современные достижения нанотехнологии в области цемента и бетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://dzen.ru/a/XXZznLwlFActzW0P/>. – Дата доступа : 12.09.2024.
- 3 Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World. Part 1 / K. Sobolev, V. Ferrada-Gutierrez // American Ceramic Society Bulletin. – 2005. – Vol. 84, no. 10. – P. 14–18.
- 4 Sanchez F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24. – P. 2060–2071.
- 5 Тртик, П. Нанотехнологии и бетон: что мы можем использовать из будущих технологий? / П. Тртик, П.Х.М. Бартош // Труды 2-го семинара Anna Maria: Цемент и бетон: тенденции и вызовы. – 2001. – С. 109–120.

УДК 625.711:539.37

### ВЛИЯНИЕ СНИЖЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

*А. О. ШИМАНОВСКИЙ, Д. А. КУПРЕЕВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. М. КАРАБАЕВ*

*Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан*

Автомобильные дороги при проезде по ним транспортных средств находятся под действием циклических нагрузок. Сезонные колебания температуры воздуха в течение года, а также ее скачки, обусловленные резкими изменениями погодных условий в течение суток, приводят к изменению напряженно-деформированного состояния слоев дорожного покрытия [1]. В связи с этим возникает необходимость оценки влияния неравномерности распределения температур в конструкции дороги на напряжения и деформации в ней.

Современные методы анализа прочности дорожных одежд принимают во внимание показатели, зависящие от свойств материалов каждого слоя одежды и грунта земляного полотна, а также от размещения и условий их работы в конструкции. При этом используемые в слоях материалы обладают существенно отличающимися друг от друга физическими свойствами, которые зависят от температуры. Выполненный анализ исследований нагруженности дорожных покрытий показал, что в настоящее время получен большой массив информации по экспериментальному определению температур, напряжений, деформаций. Также достаточно подробно разработаны методы расчета температур в материале дороги. Однако недостаточно изучено влияние температуры на напряженно-деформированное состояние дорожной одежды, на которую действуют нагрузки от движущегося транспорта. Аналитическое решение задачи о нахождении параметров деформирования слоев дорожных одежд позволяет осуществить лишь их грубую оценку [2], поэтому здесь требуется применение численных методов механики деформируемого твердого тела. В настоящее время лидирующее положение среди них занимает метод конечных элементов, который реализован в широко известном научном программном обеспечении.

Целью данной работы является определение влияния температуры поверхности дороги на прогиб и напряжения в слоях дорожной одежды с применением метода конечных элементов. Для реализации последнего был выбран программный комплекс ANSYS. При моделировании использованы подходы, разработанные ранее в работах [3, 4].

Рассматривается участок дороги, дорожная одежда которой включает пять слоев. В качестве расчетной области рассматривается структурный элемент, который имеет вид параллелепипеда, включающего несколько слоев дорожного покрытия с различными физико-механическими характеристиками [5]. Его конечно-элементная модель создана в программном комплексе ANSYS. С учетом необходимости проведения связанного статического и температурного анализа использован 20-