

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 3 / 2026, Vol. 18, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/49SAVN326.pdf>

DOI: 10.15862/49SAVN326 (<https://doi.org/10.15862/49SAVN326>)

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Пермяков, М. Б. Эффективность торкретирования в современном строительстве газопроводов / М. Б. Пермяков, Е. И. Пашков, А. Н. Ильин // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN326.pdf>. DOI: 10.15862/49SAVN326.

For citation:

Permyakov M.B., Pashkov E.I., Ilyin A.N. The effectiveness of shotcrete in modern gas duct construction. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(3): 49SAVN326. Available at: <https://esj.today/PDF/49SAVN326.pdf>. DOI: 10.15862/49SAVN326. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 69.05

Пермяков Михаил Борисович

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия
Институт строительства, архитектуры и искусства
Доцент кафедры «Промышленного и гражданского строительства»
Кандидат технических наук, доктор Ph.D, доцент
E-mail: permyakov.1965@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5685-4118>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=535560
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAL-1784-2021>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55966880300>

Пашков Евгений Иванович

ООО «ЖДС-Инжиниринг», Магнитогорск, Россия
Генеральный директор
E-mail: paschkovei@gmail.com
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=939084

Ильин Александр Николаевич

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия
Институт строительства, архитектуры и искусства
Доцент кафедры «Промышленного и гражданского строительства»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: sasa-ilin@yandex.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=701542

Эффективность торкретирования в современном строительстве газопроводов

Аннотация. В статье авторами рассматривается проблема использования технологии торкретирования в современном строительстве. Целью исследования является обоснование применения торкретирования, как эффективной технологии в современном строительстве газопроводов. В результате исследования авторам приходят к выводу, что эффективность применения технологии торкретирования в строительстве может системно решаться при использовании региональных материалов. Применение техногенного сырья в качестве заполнителей бетона на практике показывает, что фибробетон и бетон с включением отходов производств является экономичным и практичным решением. Применение цифрового управления роботизированными манипуляторами позволяет осуществлять интеллектуальное строительство,

повышая эффективность использования трудовых ресурсов. В результате экспериментальных исследований авторами был проведён анализ работ по определению коэффициента трудоемкости и производительности. Анализ трёх способов футеровки газохода объемом работ 100 м³ (торкретирование механическим способом, футеровка ручным способом, огнеупорная кладка шамотными изделиями) показал, что в части трудоёмкости процесс огнеупорной кладки реализуется, с наименьшим количеством времени рабочих и машинистов, а самым трудоемким является футеровка газоходов вручную; стоимость работ по устройству огнеупорной кладки самая высокая, а самая низкая при футеровке ручным способом; материалы для торкретирования по себестоимости дешевле материалов для огнеупорной кладки, но огнеупорная кладка является более долговечной при высокой температуре газов. Следовательно, торкретирование механическим способом является оптимальным по трудоёмкости и сметной стоимости работ по устройству современных газоходов.

Ключевые слова: торкретирование; футеровка; газоход; бетон; огнеупорная кладка; производительность труда; трудоёмкость

Введение

Развитие эффективных направлений современных объектов строительства в основном сводится к разработке новых конструктивных систем и усовершенствованию строительных материалов и технологий. Проектирование конструкций и сооружений в соответствии с жизненным циклом предопределяет необходимость разработки прогнозных методов долговечности бетона применительно к различным условиям эксплуатации [1; 2]. Целью исследования является обоснование применения торкретирования, как эффективной технологии в современном строительстве газоходов. Традиционный бетон широко используется, благодаря высокой прочности на сжатие и доступности сырья, однако, стоит отметить, что здесь имеются существенные недостатки с точки зрения долговечности, трещиностойкости и экологической устойчивости. Бетон подвержен растрескиванию под воздействием растягивающихся напряжений или колебаний температуры. Все это снижает структурную целостность и долговечность бетонных элементов [3].

Современные исследования демонстрируют выявленные закономерности влияния органоминеральных модификаторов на основе природного и техногенного сырья, различных водоудерживающих добавок, влияющих на эффективность строительно-технических свойств используемых растворов и мелкозернистых бетонов. Это позволяет разрабатывать рациональные составы сухих строительных смесей, используемые в зависимости от времени и условий применения и их различного функционального назначения.¹

Технологии торкретирования эффективно применяются в области архитектуры, строительства и реконструкции зданий и сооружений. Современный подход системной кластеризации технологии торкретирования включает в себя технологический, сырьевой, расчетный и конструктивный кластеры. Эта системность повышает качество и эффективность строительства. На сегодняшний день торкретирование является прогрессивным и инновационным методом, как в проектировании, так и строительстве. Такой подход можно рассматривать как кластер с многоуровневыми возможностями [4–6].

¹ Животкова, И. А. Сухие строительные смеси и мелкозернистые бетоны на основе модифицированных техногенных отходов: специальность 00.00.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата / Животкова Ирина Александровна. — 2025. — 195 с. — Текст: непосредственный. URL: <https://www.dissercat.com/content/sukhie-stroitelnye-smesi-i-melkozernistyie-betony-na-osnove-modifitsirovannykh-tekhnogennykh>?ysclid=mp4vylkjg7990536243 (дата обращения: 11.05.2026).

Проблема обеспеченности сырьем, гарантирующим эффективность технологической реализации проекта, может системно решаться при включении региональных ресурсов [7; 8]. Следует отметить, что применение техногенного сырья в качестве заполнителей бетона становится более актуальной и практика показывает, что фибробетон и бетон с включением отходов производств более экономичное и практичное решение. Так исследование технологий включения в состав бетона вяжущих (портландцемента), мелкого заполнителя-регенерата (песок-шлак), отходов предприятия, парообразователей (пыли газоочистки), фибры (полипропиленовой путанки) показало, что основными сырьевыми параметрами являются количество основных наполнителей, влияющих на плотность и прочность фибробетона. Исследователи приходят к выводу, что плотность фибробетона одного и того же состава при использовании технологии торкретирования в среднем на 200 кг/м^3 превышает плотность фибробетона с использованием технологии виброуплотнения [9]. На сегодняшний день использование отходов производства в виде диоксида кремния и летучей золы в качестве добавок для торкретбетонных полностью соответствует техническим требованиям для производства качественных работ [10]. Перспективным направлением являются алюминотермические шлаки производства большинства ферросплавов и лигатур (содержание Al_2O_3 : 50–85 %), отходы катализаторов производства синтетического каучука (содержание Al_2O_3 : 65–75 %), корундовые шламы абразивного производства (82–96 %), пылеунос печей кальцинации глинозема (90–97 %) и металло-минеральные отходы производства вторичного алюминия (60–72 %). Все вышеперечисленные разновидности техногенных высокоглиноземистых материалов являются потенциальным сырьем для синтеза огнеупорных, жаростойких, керамических и плавящихся материалов различного состава [11].

Попытки исследователей использовать природный материал — ресурс регионального характера, также демонстрируют положительные результаты [12]. Например, зарубежные исследователи провели удачные испытания по применению разработанного туннельного шлака, напечатанного методом 3D-печати (S-3D), который оптимизирует реологические свойства бетона. Бетон, состоящий только из туннельного шлака, продемонстрировал оптимальную тиксотропность, точность в печати, удобоукладываемость и превосходные механические свойства. Шероховатая поверхность туннельного шлака так же способствует более прочному сцеплению с вяжущими материалами. Бетонный материал, напечатанный методом S-3D с использованием 100 % туннельного шлака, показывает минимальную пористость (на 41,3 % ниже, чем без использования туннельного шлака) [13].

Применение новых технологий в строительстве и соответственно поиск новых материалов демонстрируют выход на рынок неформованных корундовых огнеупоров (мертелей и бетонов с корундовым заполнителем), полимербетонов с высокими показателями электроизоляционных прочностных характеристик в условиях термостарения [14]. Керамические материалы, созданные на основе дисперсного карбида кремния, на связке алюмомагнетиальной шпинели, с показателями объёмного экранирования устойчивы к окислению и абразивному износу в испытаниях с воздействием высокоскоростного газового потока. В данном случае скорость составляет порядка 300 м/с, в окислительной среде до 2000°C [15].

Улучшение показателей плотности и достижение более прочной структуры рабочего слоя футеровки достигается путём применения плотнопечённого периклизного порошка. Группой «Магнезит» (город Садка, Челябинской области) создано и прошло испытания связующее, которое позволяет наносить торкрет-слой существенно больше привычной толщины без его сползания со стенок. Нужно отметить, что модернизация производства предприятий — производителей торкрет-масс увеличивает возможности формирования многокомпонентных составов и их стендового испытания [16]. Создание высокотехнологичного производства импортозамещающего продукта с уникальным комплексом механических и химических свойств в рамках комплексного проекта актуально и своевременно [17].

Основная часть

Огнеупорные материалы широко применяются в отечественной промышленности. К примеру, сырьевая база Урала потенциально позволяет производить высокостойкие огнеупорные материалы и изделия. Например, применение местных глин возможно для получения огнеупорных материалов (при условии использования химических добавок, повышающих пластические и теплоизоляционные свойства) [18]. Необходимо отметить, что с точки зрения организации промышленного производства кианитовых концентратов Уральский регион является наиболее благоприятным. В нем сосредоточены основные потребители огнеупорного сырья. В Уральском регионе известно более десяти месторождений кристаллического и «аморфного» (скрытокристаллического) магнезита. Минерально-сырьевая база производства современных огнеупоров в Уральском регионе представлена таким сырьём, как: графит, магнезит, высокоглиноземистое сырьё (в частности на основе минералов группы силлиманита, содержащих 62,9 % Al_2O_3 и 37,1 % SiO_2), высококачественное природное магнезиальносиликатное сырьё (например, серпентиниты), доломит (более 15 месторождений), хромиты, циркон (более 10 месторождений и рудопроявлений, содержащих циркон в качестве основного полезного минерала или в виде минерала — спутника в комплексных рудах), пиррофиллит, алюмотермические шлаки [19]. Современное строительство газопроводов ведётся, в том числе, с применением разработанных отечественных огнеупорных материалов. На Урале в 2018 г. были проведены исследования эксплуатационных свойств материала торкрет-массы марки ТМЦВ в газопроводах новой аглофабрики № 5 г. Магнитогорска. Для выполнения исследований ООО «Огнеупор» был предоставлен материал в виде готовой сухой цементной высокотемпературной торкрет-массы марки ТМЦВ. Торкрет-масса марки ТМЦВ местного производства ООО «Огнеупор» решила проблему удешевления работ по созданию огнеупорной футеровки газопроводов аглофабрики, за счет использования региональных сырьевых ресурсов и исключения логистических проблем доставки материалов [8].

Технология 3D-печати бетоном методом набрызг-бетона (S-3D) представляет собой глубокую интеграцию 3D-печати с технологией торкретирования. Возможность применения цифрового управления роботизированными манипуляторами позволяет осуществлять интеллектуальное строительство по заранее заданным траекториям печати (в том числе под разными углами, изготовление навесных конструкций без опор, применение компилированной печати арматуры и бетона), при этом бетон, слой за слоем наносится на печатную платформу для формирования трехмерных конструкций. Этот подход актуален при строительстве тоннелей газопроводов, которые, как правило, имеют сложную скругленную форму. Помимо других преимуществ, здесь исключается большая зависимость от ручного труда, плохая адаптивность к экстремальным условиям и определенные трудности с контролем качества [20].

В части повышения эффективности производительности труда, применение современной технологии торкретирования тоже демонстрирует наглядное преимущество перед традиционными технологиями. В результате экспериментальных исследований был проведен анализ работ по определению коэффициента трудоемкости и производительности. Рассматривались три способа футеровки газопровода объемом работ 100 м³: торкретирование механическим способом, футеровка ручным способом, огнеупорная кладка (футеровка) шамотными изделиями. Сметная стоимость работ, выполненных различными способами, представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сводная таблица сметных показателей выполнения работ ()

Наименование	Торкретирование газохода механическим способом, руб.	Удельный вес, %	Футеровка газохода ручным способом, руб.	Удельный вес, %	Огнеупорная кладка газохода, руб.	Удельный вес, %
Материалы	7 842 919	42,4 %	7 842 919	44 %	19 037 965	80 %
Машины и механизмы	3 283 926	17,8 %	2 395 241	13 %	331 396	1 %
Фонд оплаты труда рабочих и машинистов	2 787 963	15,1 %	2 842 938	16 %	1 732 076	7 %
Накладные расходы	2 843 722	15,4 %	2 899 797	16 %	1 766 718	7 %
Сметная прибыль	1 728 537	9,3 %	1 762 622	10 %	1 073 887	4 %
Всего по смете	18 487 067	100 %	17 743 517	100 %	23 942 042	100 %

Составлена авторами

Коэффициент трудоемкости показывает затраты времени на осуществление работ и рассчитывается по формуле:

$$T_p = T / Q, \quad (1)$$

где:

T_p — коэффициент трудоёмкости;

T — потраченное на производство время;

Q — сметная стоимость работ.

Результаты расчета коэффициента трудоемкости рассматриваемых технологий представлены в таблице 2 и рисунке 1.

Таблица 2

Расчёт коэффициента трудоемкости

Наименование	Торкретирование газохода механическим способом	Футеровка газохода ручным способом	Огнеупорная кладка газохода
Время, ч.	7 170	9 451,1	4 502
Сметная стоимость, руб.	18 487 067	17 743 517	23 942 042
Коэффициент трудоемкости, ч/руб.	0,00039	0,00053	0,00019

Составлена авторами

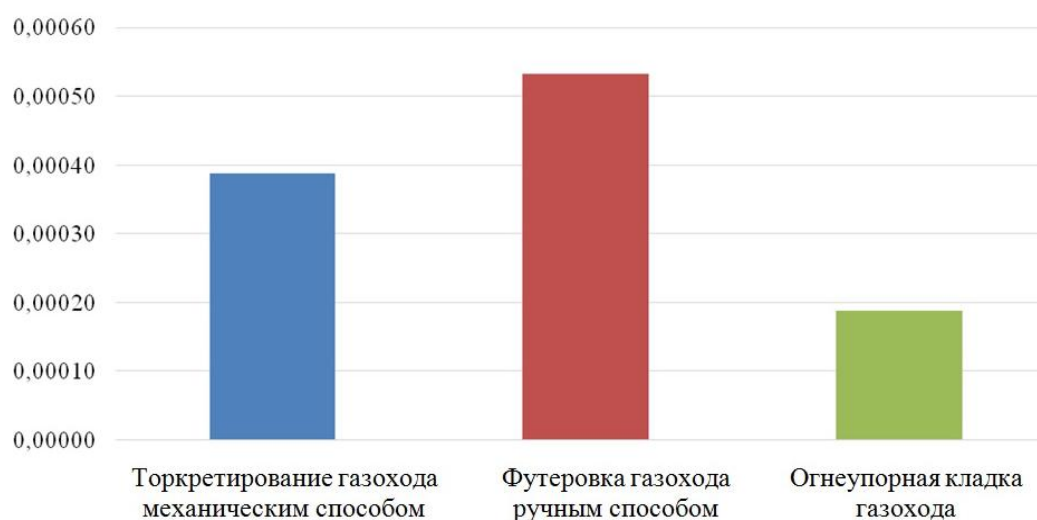


Рисунок 1. Сравнение показателей коэффициента трудоемкости (разработана авторами)

Чем меньше трудоемкость, тем выше производительность труда. Данный показатель имеет меньший результат у проведения работ огнеупорной кладкой.

Производительность труда (выработка) измеряется количеством товаров, работ и услуг, выполненных работником за единицу времени.

Данный показатель рассчитывается по следующей формуле:

$$ПР = Q / T, \quad (2)$$

где:

ПР — производительность труда;

Q — сметная стоимость работ;

T — потраченное на производство время (трудозатраты).

Результаты расчета производительности труда рассматриваемых технологий представлены в таблице 3 и рисунке 2.

Таблица 3

Расчёт производительности труда

Наименование	торкретирование газохода механическим способом	футеровка газохода ручным способом	огнеупорная кладка газохода
Сметная стоимость, руб.	18 487 067,00	17 743 517,00	23 942 042,00
Трудозатраты, ч.	7 170,00	9 451,10	4 502,00
Производительность, руб./ч.	2 578,39	1 877,40	5 318,09

Составлена авторами

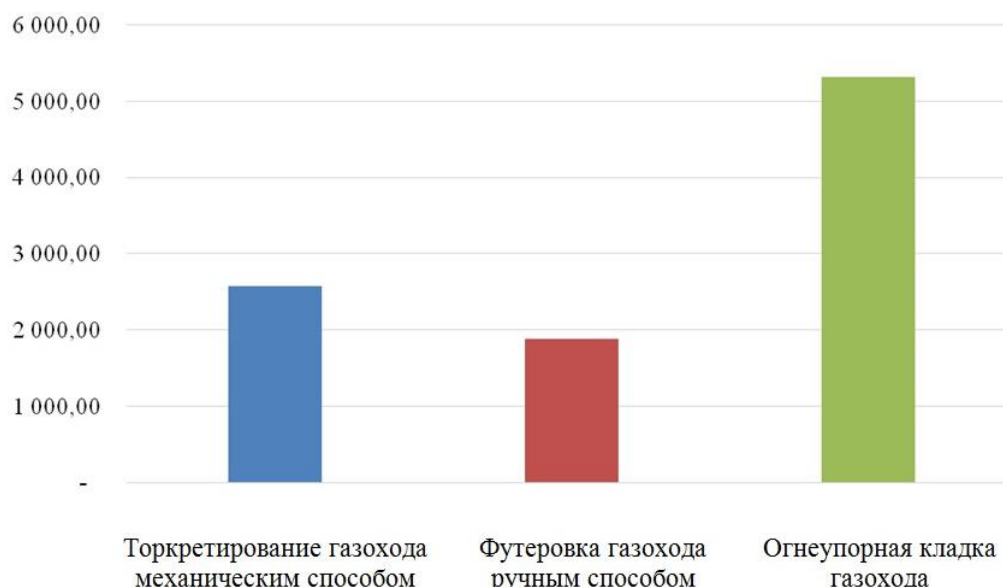


Рисунок 2. Сравнение показателей производительности (разработана авторами)

Заключение

В результате исследования были сделаны выводы.

- Эффективность технологии торкретирования, может системно решаться при включении региональных ресурсов.

- Применение техногенного сырья в качестве заполнителей бетона на практике показывает, что фибробетон и бетон с включением отходов производств является более экономичным и практичным решением.
- Применение цифрового управления роботизированными манипуляторами позволяет осуществлять интеллектуальное строительство, повышая эффективность использования трудовых ресурсов.

Анализ трёх способов футеровки газохода объемом работ 100 м³ (торкретирование механическим способом, футеровка ручным способом, огнеупорная кладка шамотными изделиями) показал:

- в части трудоемкости процессов, процесс огнеупорной кладки реализуется, с наименьшим количеством времени рабочих и машинистов, а самым трудоемким является футеровка газоходов вручную;
- стоимость работ по устройству огнеупорной кладки самая высокая, а самая низкая при футеровке ручным способом;
- материалы для торкретирования по себестоимости дешевле материалов для огнеупорной кладки, но огнеупорная кладка является более долговечной при высокой температуре газов;
- торкретирование механическим способом является оптимальным по трудоёмкости и сметной стоимости работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Experimental investigation of GFRP bar bonding in geopolymers concrete using hinged beam tests / Yong-Chang Guo, Yong-Jian Cai, Zhi-Hong Xie [и др.]. — Текст: непосредственный // Engineering Structures. — 2024. — № 322. — DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119036.
2. Малюк, В. В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия / В. В. Малюк. — Текст: непосредственный // Вестник Инженерной школы ДВФУ. — 2020. — № 45. DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-11>.
3. Прочность бетона на растяжение в раннем возрасте/ Synergistic effect of expansive agents and glass fibres on fatigue bending performance of seawater sea sand concrete / Д. Х. Нгуен, Z. Xiong, G. Mai [и др.]. — Текст: непосредственный // Construction and Building Materials. — 2024. — № 421. — С. 135665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135665> (дата обращения: 11.05.2026).
4. Голова, Т. А. Кластеризация технологии шоткринга с позиции единого системного подхода / Т. А. Голова, Л. Майлян. — Текст: непосредственный // Строительство и архитектура. — 2022. — № Т. 10 № 2(35). DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-10-2> (дата обращения: 13.05.2026).
5. Иванова, Т. А. Технологии торкретирования для строительства и реконструкции зданий и сооружений / Т. А. Иванова. — Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2024. — 88 с. — Текст: непосредственный. — DOI: 10.31483/a-10679. — EDN EPHFAA.

6. Permyakov, M.B. Lining Application by means of Guniting (Using Machine TOR-1) / M.B. Permyakov, E.I. Pashkov, T.V. Krasnova. — Текст: непосредственный // Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety: ICCATS 2022, Sochi, 04–10 сентября 2022 года. — Switzerland: Springer Cham, 2023. — С. 89–97. — DOI: 10.1007/978-3-031-21120-1_9. — EDN BBCROU.
7. Technology for Gunning Gas Ducts of Heat Generating Units with Com-bined Refractory Lining / E.I. Pashkov, M.B. Permyakov, T.V. Krasnova, A.A. Gerasimova. — Текст: непосредственный // AIP Conference Proceedings: Proceedings of the international conference on engineering research 2021 (ICER 2021), MOSCOW, RUSSIA, Moscow, 20–22 октября 2022 года. Vol. 2559. — Moscow: AIP PUBLISHING, 2022. — С. 060012. — DOI: 10.1063/5.0099431. — EDN MXURDM.
8. Pashkov, E.I. Use of local materials in refractory shotcreting of gas ducts / E.I. Pashkov, M.B. Permyakov, T.V. Krasnova. — Текст: непосредственный // AIP Conference Proceedings: VII International Conference “Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures” (SPCECI2021). — Yekaterinburg: AIP Publishing, 2023. — С. 020036. — DOI: 10.1063/5.0123356. — EDN SRVTTT.
9. Голова, Т. А. Инновационный подход к выбору технологии укладки фибробетона из отходов местных производств на примере кластерного анализа / Т. А. Голова, И. А. Магеррамова. — Текст: непосредственный // Вестник евразийской науки. — 2024. — № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnyy-podhod-k-vyboru-tehnologii-ukladki-fibrobetona-iz-othodov-mestnyh-proizvodstv-na-primere-klasternogo-analiza> (дата обращения: 14.05.2026).
10. Ясницкий, А. Б. Зарубежный опыт применения торкретбетона в строительстве / А. Б. Ясницкий. — Текст: непосредственный // Строительство. Архитектура. Дизайн: Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Курск, 25 апреля 2024 года. — Курск: ЗАО Унив. книга, 2024. — С. 238–242. — EDN BSMNLH URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65853613&pff=1> (дата обращения: 11.06.2026).
11. Минеральный состав и применение высокоглиноземистого техногенного сырья / В. А. Перепелицын, В. А. Коротеев, В. М. Рытвин, В. Г. Григорьев. — Текст: непосредственный // Ежегодник-2010, Тр. ИГГ УрО РАН. — 2011. — № 158. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16926558_31214272.pdf (дата обращения: 11.06.2026).
12. Пермяков, М. Б. Технология устройства футеровок газоходов средствами торкретирования на промышленных объектах Урала / М. Б. Пермяков, Е. И. Пашков. — Текст: непосредственный // Строительное производство. — 2025. — № 1. — С. 112–118. — DOI: 10.54950/26585340_2025_1_112. — EDN YCNPSD.
13. Spray-based 3D printed tunnel slag concrete: Evaluation for printability and mechanical performance / X. Liu, C. Li, P. Guo [и др.]. — Текст: непосредственный // Construction and Building Materials. — 2025. — № 467. — С. 140392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140392>.
14. Пашков, Е. И. Современные технологии футеровки газоходов теплогенерирующих агрегатов огнеупорными материалами / Е. И. Пашков, М. Б. Пермяков, Т. В. Краснова. — Текст: непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. — 2021. — № 6(108). — С. 95–99. — DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.015>.

15. Огнеупорные материалы для использования при высоких температурах / Е. С. Лукин, Н. А. Попова, Л. Т. Павлюкова [и др.]. — Текст: непосредственный // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 59. DOI: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-5-65-74> (дата обращения 12.06.2026).
16. Громкие миксы нового поколения Magnesite Group / Л. М. Аксельрод, М. Ю. Турчин, А. П. Лаптев [и др.]. — Текст: непосредственный // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 29. DOI: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-5-65-74> (дата обращения: 13.06.2026).
17. Математические зависимости между механическими свойствами высокопрочного листового проката от его химического состава и условий термообработки / М. В. Чукин, П. П. Полецков, Д. Г. Набатчиков [и др.]. — Текст: непосредственный // Вестник Магнитогорского Государственного Технического Университета имени Г. И. Носова. — 2016. — № т. 14, вып. 4. — С. 72–75. — DOI: 10.18503 / 1995-2732-2016-14-4-72-75.
18. Пашков, Е. И. Защита теплотехнических агрегатов в агрессивной высокотемпературной среде строительными теплоизоляционными материалами / Е. И. Пашков, М. Б. Пермяков, Т. В. Краснова. — Текст: непосредственный // Вестник евразийской науки. — 2021. — № Т. 13, № 2. — EDN FESJIN URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46335336> (дата обращения: 11.06.2026).
19. Перепелицын, В. А. Минерально-сырьевая база для производства современных огнеупоров (продолжение) / В. А. Перепелицын, И. В. Юкеева, Л. В. Остряков. — Текст: непосредственный // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 6. — С. 55–64. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15288902_33279702.pdf. (дата обращения: 11.06.2026).
20. Spray-based 3D printed tunnel lining concrete: Optimization of full-angle printing path / Y. Sun, X. Liu, L. Wang [и др.]. — Текст: непосредственный // Cement and Concrete Composites. — 2026. — № Volume 170. — С. 106581. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2026.106581> (дата обращения: 11.06.2026).

Permyakov Mikhail Borisovich

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
Institute of Construction, Architecture and Art
E-mail: permyakov.1965@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5685-4118>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=535560

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAL-1784-2021>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55966880300>

Pashkov Evgeny Ivanovich

LLC «ZhDS-Engineering», Magnitogorsk, Russia
E-mail: paschkovei@gmail.com

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=939084

Ilyin Alexander Nikolaevich

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
E-mail: sasa-ilin@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=701542

The effectiveness of shotcrete in modern gas duct construction

Abstract. In this article, the authors examine the use of shotcrete technology in modern construction. The aim of the study is to substantiate the use of shotcrete as an effective technology in modern gas duct construction. The authors conclude that the effectiveness of shotcrete in construction can be systematically addressed by using regional materials. The use of man-made raw materials as concrete aggregates demonstrates that fiber-reinforced concrete and concrete incorporating industrial waste are cost-effective and practical solutions. The use of digital control of robotic manipulators enables intelligent construction, increasing labor efficiency. Through experimental studies, the authors analyzed work to determine labor intensity and productivity factors. An analysis of three methods for lining a 100m³ flue gas duct (mechanical shotcreting, manual lining, and refractory lining with fireclay products) revealed that, in terms of labor intensity, refractory lining requires the least amount of labor for workers and operators, while manual lining is the most labor-intensive. The cost of installing refractory lining is the highest, while manual lining is the lowest. Shotcrete materials are less expensive than refractory lining materials, but refractory lining is more durable at high gas temperatures. Consequently, mechanical shotcreting is the optimal method in terms of labor intensity and estimated cost for installing modern flue gas ducts.

Keywords: shotcrete; lining; flue; concrete; refractory masonry; labor productivity; labor intensity