

Использование золошлаковых отходов в гидротехническом бетоне для шахтной крепи*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-2-45-49>

Основная тенденция развития производства строительных материалов в XXI веке связана с использованием в качестве источников сырья – техногенного. В данной работе исследована применимость техногенного сырья в технологии бетона. Разработаны составы гидротехнического бетона с добавками золы уноса на крупном традиционном заполнителе и мелкозернистом из золошлаковой смеси. Показано, что замена минерального сырья техногенными отходами сопровождается улучшением физико-механических свойств бетонов при одновременной экономии цемента и традиционного минерального сырья – щебня и песка. Результаты лабораторных исследований подтверждены положительными производственными испытаниями при монолитном бетонировании опытной заходки вентиляционного шахтного ствола. Использование золошлаковых отходов в гидротехническом бетоне позволило сэкономить 30% цемента и 100% щебня и песка.

Ключевые слова: зола уноса, золошлаковая смесь, техногенное сырье, гидротехнический золобетон, монолитная бетонная шахтная крепь

Для цитирования: Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Использование золошлаковых отходов в гидротехническом бетоне для шахтной крепи // Уголь. 2022. № 2. С. 45-49. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-45-49.

ВВЕДЕНИЕ

Гидротехнический бетон применяется для возведения бетонной шахтной крепи. Этот бетон имеет сравнительно высокую цену в сравнении с обычным бетоном. Эффективным способом снижения себестоимости бетона и экономии минерального сырья для его изготовления является использование в составе бетона золошлаковых отходов.

Запасы природного минерального сырья с каждым годом истощаются, осложняются условия его добычи. В то же время на земной поверхности в отвалах складированы огромные запасы отходов добычи и переработки природного сырья. Из накопившихся отходов многотоннажными являются побочные продукты

БУРАВЧУК Н.И.

Канд. хим. наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией
ресурсосберегающих технологий
Института математики механики
и компьютерных наук им. И.И. Воровича
Южного федерального университета,
344006, г. Ростов-на-Дону, Россия,
e-mail: nburavchuk@sfedu.ru

ГУРЬЯНОВА О.В.

Старший научный сотрудник
Института математики механики и
компьютерных наук им. И.И. Воровича
Южного федерального университета,
344006, г. Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: oguryanova@sfedu.ru

топливно-энергетического комплекса – золошлаковые материалы. Скопления этих отходов по качеству и количеству содержащегося минерального сырья, пригодного для выпуска полезной продукции, следует отнести к техногенным месторождениям [1]. Золошлаковые отходы – это новый вид сырья – техногенного. Они представляют собой золу уноса, улавливаемую электрофильтрами, шлак и золошлаковую смесь гидроудаления.

Постановка задачи. По использованию золошлаковых отходов в технологии строительных материалов имеются разработки отечественных и зарубежных исследователей [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Однако большинство из этих решений не нашло практической реализации, и объемы утилизации золошлаковых отходов очень низки.

Цель данной работы заключается в установлении применимости золошлаковых отходов в составах гидротехнического бетона для возведения монолитной бетонной крепи шахтных стволов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета, 2020 г. (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации) по проекту ВнГр-07/2020-04-ИМ.

Химический состав техногенного сырья

Проба	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃ общий	MgO	SO ₃ общий	TiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	P ₂ O ₅	Потери при прокаливании (п.п.п.)
Зола уноса	56,74	21,53	2,15	6,43	1,88	0,69	0,96	2,84	0,15	6,56
Золошлаковая смесь	55,97	23,56	2,13	6,17	1,97	0,54	0,67	2,70	0,13	5,26

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Характеристика материалов. Объектами исследования были: зола уноса и золошлаковая смесь Новочеркасской ГРЭС; щебень Замчаловского карьера Ростовской области; цемент марки 500 Новороссийского цементного завода «Октябрь»; щебень из плотных песчаных пород, фракция – 5–20 мм, марка по дробимости – 1000, морозостойкости – F50, истираемости – И1. В табл. 1 приведены данные по химическому составу золошлаковых отходов.

Химический состав исследуемых объектов представлен в основном оксидами кремния, алюминия и железа. В минеральной части твердого топлива преобладают глинистые минералы. Наиболее характерным типом глинистых минералов в угольных пластах является каолинит (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O). При температурном воздействии минеральная часть топлива подвергается превращениям, связанным с дегидратацией, диссоциацией, окислением, полиморфными изменениями, взаимодействием в твердой фазе, в расплаве, аморфизацией. Эти факторы сказываются на свойствах, степени активизации и реакционной способности конечных продуктов термического воздействия – золошлаковых материалов.

При исследовании свойств отходов методами физико-химического анализа установлено, что в составе золы и шлака можно выделить аморфную и кристаллическую фазы [11]. Аморфная составляющая представлена стеклом и аморфизованным глинистым веществом. Кристаллическая фаза включает измененные зерна минералов исходного топлива и кристаллические новообразования, возникшие при сжигании топлива (муллит, магнезит, гематит и др.). На рис. 1 приведены рентгенограммы золы уноса и шлака.

Основными активными составляющими зол и шлаков, способными к дальнейшему взаимодействию, являются

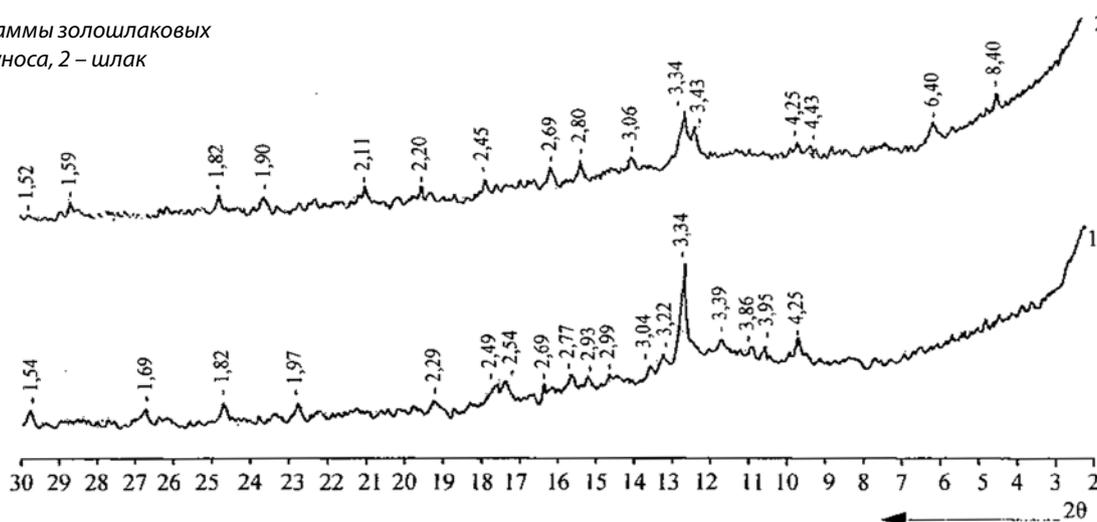
метакаолинит, а также аморфные SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, у которых под влиянием пиропроцессов произошло нарушение структуры исходных минералов.

В лабораторных условиях были подобраны составы золобетона с добавкой золы уноса с щебнем и мелкозернистым заполнителем из золошлаковой смеси. Исследование применимости золошлаковых материалов для шахтной крепи проведено для бетонов класса В22,5, В30 с осадкой конуса 10-12 см. Расход цемента в контрольных составах составлял от 390 до 475, золы уноса – 170–250, золошлаковой смеси – 398–1726 кг/м³. Снижение расхода цемента по сравнению с контролем составляло 15–35%. Для оценки физико-механических свойств бетона были изготовлены образцы-кубы с длиной ребра 100 мм; призмы квадратного сечения 100×100×400 мм. Твердение образцов проходило в нормальных условиях при температуре (20±3)°С и относительной влажности воздуха (95±5)%. Физико-механические свойства гидротехнического золобетона для возведения шахтной крепи приведены в табл. 2

Зола для бетона – полифункциональная добавка. Зола уноса в составе бетона заменяет часть цемента, одновременно являясь микрозаполнителем, улучшает зерновой состав мелкого заполнителя бетона, способствует повышению плотности бетона. Шарообразная форма и гладкая поверхность зерен золы придают ей свойства пластифицирующей добавки. Пластифицирующий эффект способствует повышению связности бетонной смеси и подвижности, улучшению удобоукладываемости и формуемости бетонной смеси. Поверхность затвердевшего бетона плотная, ровная, без раковин и других дефектов.

В золошлаковой смеси содержится до 30% золы уноса. Золошлаковая смесь по сравнению с песком обладает ря-

Рис. 1. Рентгенограммы золошлаковых отходов: 1 – зола уноса, 2 – шлак



Физико-механические свойства гидротехнического золобетона

Номер состава	Марка бетона	Прочность, МПа (сутки)				Морозостойкость	Водонепроницаемость	Экономия цемента, %
		28		360				
		$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$			
1	200 Ок 10-12 см	25,4	3,37	30,2	3,73	F200	W4	30
2	200 Ок 10-12 см	23,7	3,77	27,1	4,19	F300	W6	15
3	300 Ок 10-12 см	31,8	3,85	38,3	4,27	F300	W8	30
4	300 Ок 10-12 см	33,0	4,15	40,8	4,60	F400	W12	15

1, 3 – составы бетона с щебнем; 2, 4 – составы мелкозернистого бетона; $R_{сж}$ – прочность на сжатие; $R_{изг}$ – прочность при изгибе

дом преимуществ. В ней нет глинистых и илистых примесей. По зерновому составу золошлаковая смесь – это крупнозернистый заполнитель, модуль крупности, – как правило, выше двух. Главная особенность золы и шлака – гидравлическая активность.

Испытание гидротехнического золобетона было проведено при монолитном бетонировании шахтной крепи восточного вентиляционного ствола № 2 шахты им. Октябрьской революции (г. Шахты Ростовской области). Для бетонирования опытной заходки высотой 4 м (диаметр ствола – 6 м) использовали золу сухого отбора и золошлаковую смесь из гидроотвалов. Часть заходки была забетонирована золобетоном, содержащим крупный заполнитель – щебень и золошлаковую смесь вместо песка. Содержание золы уноса – 250 кг/м³. Расход цемента снижен на 30% (143 кг на 1 м³). Остальные части изготовлены из мелкозернистого золобетона. Экономия цемента – 30%, песка и щебня – 100%. Проектная марка бетона по прочности на сжатие – 200 (класс бетона – В15), по водонепроницаемости – не менее W2.

Бетонирование шахтного ствола золобетоном принципиально не отличалось от традиционной технологии возведения бетонной крепи. Опалубку сняли через 7 сут. Бетон при простукивании «звенит». Испытание золобетона в стволе спустя 28 суток после бетонирования проведено неразрушающим методом контроля. На разных отметках заходки уложенный мелкозернистый золобетон имеет среднюю прочность при сжатии 24,7 МПа (класс бетона – В15). Контрольные испытания обычного бетона в этом стволе соответствовали классу В15. При испытании неразрушающим методом контроля золобетона шахтной крепи в шахтном стволе спустя год выявлено следующее. Золобетон с щебнем показал прочность 48,9 МПа, мелкозернистый бетон на цементе и золошлаковых материалах имел прочность 53,8 МПа. Гидротехнический золобетон по водонепроницаемости имеет марку W10; W12, по морозостойкости – F300; F400. Экономия цемента – 20–30%, инертных природных заполнителей – 100%.

Одна из особенностей золобетона – высокая стойкость к действию агрессивных сред. Сравнительные испытания гидротехнического золобетона на коррозионную стойкость были проведены при выдержке образцов в 5%-ом растворе сульфата натрия в течение двух лет. В составе бетона содержание золы уноса составляло 250 кг/м³. У контрольных образцов без золы наблюдаются нарушение

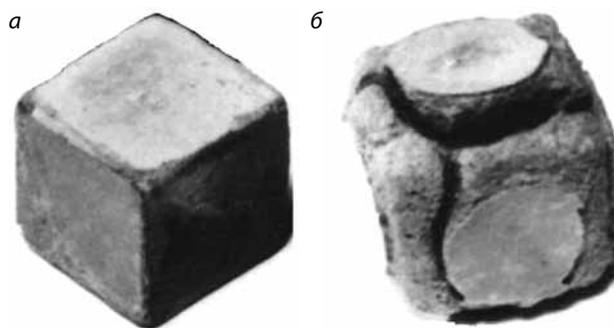


Рис. 2. Образцы бетона после испытаний на коррозионную стойкость: а – золобетон; б – традиционный бетон

целостности образца и постепенное падение прочности вплоть до разрушения к концу срока испытаний. В образцах с золой уноса не отмечено внешних признаков разрушения (рис. 2). Коэффициент стойкости у образцов золобетона к концу испытаний превышал единицу.

Твердение бетонных композиций, содержащих золошлаковые материалы, происходит в соответствии с принципами физико-химической механики дисперсных систем [12]. Влияние золы уноса и шлака на механизм структурообразования имеет физическую и химическую природу. Физический фактор связан с размером и высокой поверхностной энергией частиц. В начальный период твердения влияние золы и шлака сводится к физическому фактору, изменяются дисперсность и зерновой состав системы. Частицы золы уноса и шлака заполняют объем между крупнозернистыми частицами. Увеличиваются удельная поверхность системы и количество контактов. Вокруг зольных частиц возникает оболочка новообразований. Прочность на сжатие золобетонных образцов в ранние сроки твердения (до семи суток) меньше по сравнению с обычным бетоном. Это вызвано малой реакционной способностью зольных частиц. В более поздние сроки твердения проявляется химический характер в механизме структурообразования бетонной композиции. Он обусловлен пуццолановой активностью золы уноса и шлака. Пуццолановый эффект вносит наибольший вклад в процесс формирования структуры и прочности цементного камня. Результатом проявления пуццолановой активности является связывание активными компонентами золошлаковой смеси свободной извести, образующейся при гидратации цемента. Система

приобретает структурную прочность в связи с образованием необратимых фазовых контактов. Образующиеся дополнительные соединения заполняют пустоты и поры контактной зоны. В результате изменяется пористая структура искусственного камня: увеличивается количество мелких пор и капилляров. Это положительно сказывается на прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и сульфатостойкости бетона, что подтверждается экспериментально.

На первой стадии структурообразования формируется каркас структуры коагуляционного типа, прочность которого обеспечивается межмолекулярными силами. Прочность таких структур невелика. В дальнейшем, по мере углубления процессов гидратации, растет объем новообразований. Это приводит систему к стесненным условиям (перенасыщению), к уплотнению гелевидной фазы, росту и срастанию кристаллов. Коагуляционные структуры переходят в коагуляционно-конденсационные с образованием кристаллических веществ, упрочняющихся со временем в соединения с кристаллизационно-конденсационным типом структуры с ионными и ковалентными связями. Высокие показатели физико-механических свойств золобетона обусловлены образованием низкоосновных гидратных образований типа C-S-H (I).

ВЫВОДЫ

Золошлаковые отходы представляют собой новый вид минерального сырья – техногенного. Эти техногенные материалы могут в бетонных смесях заменить природные заполнители и часть вяжущего. Использование золошлаковых материалов позволяет улучшить строительно-технические свойства и эксплуатационные характеристики строительных композитов. Перспективность использования техногенных месторождений, в частности золошлаковых отходов, очевидна, так как их использование позволяет одновременно решать целый ряд экономических, социальных и экологических проблем.

Список литературы

1. Артемьев В.Б., Шпирт М.Я., Силютин С.А. Использование твердых отходов добычи и переработки углей. М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2013. 432 с.

2. Абдрахимова Е.С. Использование отходов углеобогащения и межсланцевой глины в производстве керамического кирпича // Уголь. 2019. № 7. С.67-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-67-69.

3. Власова В.В., Артемова О.С., Фомина Е.Ю. Определение направлений эффективного использования отходов ТЭС // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11 С. 36-41.

4. Маданбеков Н.Ж., Осмонова Б.Ж. Повышение эффективности использования дорожного асфальтобетона путем применения золы уноса в качестве минерального порошка // Инновационная наука. 2016. № 12. С. 121.

5. Федорова Н.В., Шафорост Д.А. Перспективы использования золы уноса тепловых электростанций Ростовской области // Теплоэнергетика. 2015. № 1. С. 53-58.

6. Римкевич В.С., Пушкин А.А., Чурушова О.В. Комплексная переработка золы ТЭС // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 6. С. 250.

7. Li Z. Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultrahigh performance concrete // Materials Today Communications. 2016. Vol. 6. P. 74–80.

8. Synthesis of CHA zeolite using low cost coal fly ash / X. Jina, N. Jia, Ch. Songa et al. // Procedia Engineering. 2015. Vol. 121. P. 961–966.

9. Naganathan S., Mohamed A. Y.O., Mustapha K.N. Performance of bricks made using fly ash and bottom ash // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 96. P. 576–580.

10. Sena da Fonseca B., Galhano C., Seixas D. Technical feasibility of reusing coal combustion by-products from a thermoelectric power plant in the manufacture of fired clay bricks // Applied Clay Science. 2015. Vol. 104. P. 189–195.

11. Improving Road Pavement Characteristics. Applications of Industrial Waste and Finite Element Modelling. Series: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering / A.A. Lyapin, I.A. Parinov, N.I. Buravchuk et al. Springer Cham, Switzerland. 30 November 2020, pp. 41-75.

12. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 384 с.

Original Paper

UDC 662.613.11:693.5 © N.I. Buravchuk, O.V. Guryanova, 2022
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 2, pp. 45-49
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-2-45-49>

Title
THE USE OF ASH AND SLAG WASTE IN HYDRAULIC CONCRETE FOR SHAFT SUPPORT

Author
Buravchuk N.I.¹, Guryanova O.V.¹
¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

Authors Information
Buravchuk N.I., PhD (Chemistry), Senior Research Associate, Head of Laboratory, Vorovich Institute of Mathematics of Mechanics and Computer Science, e-mail: nburavchuk@sfned.ru
Guryanova O.V., Senior Research Associate, Vorovich Institute of Mathematics of Mechanics and Computer Science, e-mail: oguryanova@sfned.ru

Abstract
The main trend in the development of the production of building materials in the XXI century is associated with the use of man-made raw materials as sources. In this work, the applicability of technogenic raw materials in concrete technology has been investigated. Two types of hydraulic concrete with fly ash additives have been developed on a large traditional

MINERAL RESOURCES

aggregate and a fine-grained aggregate from an ash-and-slag mixture. The results of tests of hydraulic concrete for monolithic construction – concrete shaft support using ash and slag waste are presented. The results of laboratory studies were confirmed by positive production tests during monolithic concreting of an experimental run-in of a ventilation shaft. The use of ash and slag waste in hydraulic concrete allowed saving 30% of cement and 100% of crushed stone and sand.

Keywords

Fly ash, Ash and slag mixture, Man-made raw materials, Hydraulic ash concrete, Monolithic concrete shaft support.

References

1. Artemyev V.B., Shpirt M.Ya., & Silyutin S.A. Utilization of solid wastes of coal mining and processing. Moscow, Gornoe Delo Publ., Cimnerian Centre LLC, 2013, 432 p. (In Russ.).
2. Abdрахимова E.S. Use of coal processing waste and inter-shale clay in the production of ceramic bricks. *Ugol'*, 2019, (7), pp. 67-69. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-67-69.
3. Vlasova V.V., Artemova O.S. & Fomina E.Yu. Identification of directions in efficiently use wastes of thermal power plants. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2017, Vol. 21, (11), pp. 36-41. (In Russ.).
4. Madanbekov N.Zh. & Osmonova B.Zh. Enhancing the efficiency of road asphalt concrete by using fly ash as the mineral powder. *Innovacionnaya nauka*, 2016, (12), pp. 121. (In Russ.).
5. Fedorova N.V. & Shaforost D.A. Prospects to use fly ash from thermal power plants in the Rostov Region. *Teploenergetika*, 2015, (1), pp. 53-58. (In Russ.).
6. Rimkevich V.S., Pushkin A.A. & Churushova O.V. Complex processing of ash from thermal power plants. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2015, (6), pp. 250. (In Russ.).
7. Li Z. Drying shrinkage prediction of paste containing meta-kaolin and ultrafine fly ash for developing ultrahigh performance concrete. *Materials Today Communications*, 2016, Vol. 6, pp. 74-80.

8. Jina X., Jia N., Songa Ch. et al. Synthesis of CHA zeolite using low cost coal fly ash. *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 121, pp. 961-966.

9. Naganathan S., Mohamed A.Y.O. & Mustapha K.N. Performance of bricks made using fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 2015, Vol. 96, pp. 576–580.

10. Sena da Fonseca B., Galhano C. & Seixas D. Technical feasibility of reusing coal combustion by-products from a thermoelectric power plant in the manufacture of fired clay bricks. *Applied Clay Science*, 2015, Vol. 104, pp. 189-195.

11. Lyapin A.A., Parinov I.A., Buravchuk N.I. et al. Improving Road Pavement Characteristics. Applications of Industrial Waste and Finite Element Modeling. Series: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Springer Cham, Switzerland. 30 November 2020, pp. 41-75.

12. Rebinder P.A. Surface phenomena in disperse systems. Physical and chemical mechanics. Moscow, Nauka Publ., 1979, 384 p. (In Russ.).

Acknowledgements

The work was financially supported by the Southern Federal University, 2020. (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation) under Project ВнГр-07/2020-04-ИМ.

For citation

Buravchuk N.I. & Guryanova O.V. The use of ash and slag waste in hydraulic concrete for shaft support. *Ugol'*, 2022, (2), pp. 45-49. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-2-45-49.

Paper info

Received October 22, 2021

Reviewed December 10, 2021

Accepted January 18, 2022

Ставка на уголь

Германия вынуждена вместо газа покупать больше угля, несмотря на «зеленую повестку» и стремление избавиться от самого грязного ископаемого топлива. В начале года доля угля в энергобалансе страны существенно выросла. Россия – крупнейший поставщик угля в Германию.

Из-за высоких цен на газ рентабельность производства электроэнергии на угольных ТЭС значительно выше, чем на ТЭС, использующих в качестве топлива газ. По мнению участников рынка, которые ориентируются на форвардные цены, такая ситуация сохранится до 2023 г.

Россия доминирует на рынке угля северо-западной Европы. По данным агентства Eurostat, в январе – ноябре 2021 г. поставки российского угля в Германию, Нидерланды и Бельгию достигли 20,3 млн т, что составляет 67% от всего импорта угля в эти страны. Основным покупателем угля стала Германия.

По информации германской исследовательской организации Fraunhofer, с 16 по 22 января 2022 г. доля угля в энергобалансе Германии значительно выросла и достигла 37%: на бурый уголь приходится 14%, на каменный – 23%. В 2021 г. на угольные ТЭС приходилось только 28,1% от всей электроэнергии, произведенной в стране.

РЕКЛАМА



НПП ЗАВОД МДУ

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЗАВОД МОДУЛЬНЫХ
ДЕГАЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК»

**ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ДЕГАЗАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ
МЕТАНА**

МЕТАН ПОД КОНТРОЛЕМ!

РОССИЯ
г. НОВОКУЗНЕЦК
ШОССЕ СЕВЕРНОЕ, 8

WWW.ZAVODMDU.RU
INFO@ZAVODMDU.RU
ТЕЛ.: +7 (3843) 991-991