

DOI 10.35264/1996-2274-2021-1-152-159

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Н.И. Буравчук, зав. лаб. ФГАОУ ВО «ЮФУ», канд. хим. наук, *nburavchuk@sedu.ru*

О.В. Гурьянова, ст. науч. сотр. ФГАОУ ВО «ЮФУ», *oguryanova@sedu.ru*

Рецензент: Пухаренко Ю.В.

На основе техногенного сырья – золошлаковых отходов и горелых пород шахтных отвалов – подобраны составы мелкозернистого бетона. Разработанные составы апробированы при изготовлении опытных партий тротуарных плит. Введение в состав бетона золы уноса и отсевов дробления горелых пород улучшает физико-механические свойства изделий при значительной экономии цемента. Доказана применимость исследуемого техногенного сырья в мелкозернистом бетоне, предназначенном для изготовления тротуарных плит и элементов мощения дорог. Изделия имеют высокие показатели физико-механических свойств и качества.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, горелые породы шахтных отвалов, зола уноса, отсеи дробления горелых пород, мелкозернистый заполнитель, физико-механические свойства мелкозернистого бетона, тротуарные плиты.

FINE-GRAINED CONCRETE BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS FOR ROAD SURFACES

N.I. Buravchuk, Head of Laboratory, FGAOU VO «SFedU», Doctor of Chemistry, *nburavchuk@sedu.ru*

O.V. Guryanova, Senior Researcher, FGAOU VO «SFedU», *oguryanova@sedu.ru*

On the basis of technogenic raw materials – ash and slag waste and burnt rocks of mine dumps – the compositions of fine-grained concrete were selected. The developed compositions have been tested in the manufacture of pilot batches of paving slabs. The introduction of fly ash and crushing screenings of burnt rocks into the composition of concrete improves the physical and mechanical properties of products with significant savings in cement. The applicability of the investigated technogenic raw materials in fine-grained concrete, intended for the manufacture of paving slabs and road paving elements, has been proved. Products have high indicators of physical and mechanical properties and quality.

Keywords: ash and slag waste, burnt rocks of mine dumps, fly ash, screenings of crushing of burnt rocks, fine-grained aggregate, physical and mechanical properties of fine-grained concrete, sidewalk slabs.

Введение

Одной из мер по улучшению экологического состояния среды обитания человека является замена асфальтобетонных покрытий тротуаров, площадок и пешеходных дорожек мелкоштучными изделиями из бетона на минеральных заполнителях и вяжущих. Изделия из мелкозернистого бетона должны иметь высокую прочность, морозостойкость, износостойкость, долговечность. Получить изделия с такими характеристиками из обычного цементно-

песчаного бетона не всегда возможно. Природные пески зачастую имеют низкий модуль крупности (к примеру, в Ростовской обл. преобладают пески с модулем крупности 1,2–1,4). Согласно требованиям нормативных документов применение таких песков в бетонах не допускается, поскольку это неизбежно ведет к значительному перерасходу цемента. Поэтому для мелкозернистых бетонов следует рекомендовать другие заполнители, обеспечивающие достижение необходимых характеристик бетона в пределах установленных норм расхода цемента.

В условиях интенсивного развития строительной отрасли и увеличивающихся потребностей в минеральных сырьевых ресурсах вопросы их комплексного использования и охраны окружающей среды имеют особое значение и с каждым днем становятся все острее и актуальнее. В данном контексте ресурсосбережение приобретает всеобъемлющий характер и становится частью современного экономического мировоззрения.

В Ростовской обл. остро стоит проблема качественного песка. Для бетонов и строительных растворов песок добывают из поймы р. Дон. Такой песок не по всем показателям отвечает требованиям нормативных документов. Кроме того, при его добывке наносится ущерб руслу реки. Источником пополнения минеральной сырьевой базы для строительной отрасли могут стать отходы угольной промышленности и теплоэнергетики. В регионе в отвалах накоплено огромное количество шахтных пород и золошлаковых отходов. Скопления таких отходов по количеству и качеству пригодности к использованию представляют собой техногенные месторождения. Исследованиями и практическим опытом доказано [1–5], что из техногенного сырья (шахтных пород и золошлаковых отходов) при соответствующей подготовке можно получать мелкие заполнители различной крупности для использования их в мелкозернистых бетонах.

Методика

В данной работе исследовано влияние дисперсных добавок и заполнителей из золошлаковых отходов и горелых пород шахтных отвалов на свойства мелкозернистого бетона, предназначенного для изготовления элементов мощения городских улиц и тротуаров. Объектами исследования были выбраны золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС и горелые породы шахты «Майская» Ростовской обл.

Проведены аналитико-лабораторные исследования техногенного сырья, разработаны составы мелкозернистого бетона, определены их физико-механические свойства, изготовлены в производственных условиях опытные партии тротуарных плит. Проведение комплекса методов исследования и технологических испытаний позволило установить применимость используемого техногенного сырья в мелкозернистых бетонах.

Для исследований использованы тонкодисперсные добавки: зола уноса, молотая горелая порода, мелкозернистый заполнитель из золошлаковых отходов и горелых пород шахтных отвалов. Зола уноса или зола сухого отбора на электростанции улавливается электрофильтрами и отгружается в цементовозы. Молотая горелая порода получена при измельчении дробленых горелых пород шахтных отвалов. Мелкозернистые заполнители для бетона представлены золошлаковой смесью из золоотвалов и отсевами дробления горелых пород.

Результаты

Золошлаковые отходы и горелые породы шахтных отвалов образуются в результате термохимических превращений углевмещающих пород, складированных на поверхности в отвалах, и неорганической части топлива в котлоагрегатах. Генезис их образования различен, как и свойства. На их состав и свойства оказывают влияние как состав углевмещающих пород минеральных компонентов топлива, так и условия обжига и сжигания. Образование горелых пород происходит в процессе длительного (десятки лет) самообжига в отвалах.

Золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС представлены золой уноса (зола сухого отбора) и золошлаковой смесью. Зола уноса улавливается электрофильтрами и отгружается

в цементовозы. Часть золы и топливного шлака (золошлаковая смесь) системой гидравлического золошлакоудаления направляется в отвалы. В золошлаковой смеси содержится, как правило, до 30 % золы уноса. По химическому составу исследуемое техногенное сырье является кислым, содержание оксида кремния – более 50 %. В табл. 1 приведены сведения о химическом составе золы и шлака Новочеркасской ГРЭС и горелой породы шахты «Майская». Это сырье представлено в основном из свободных и связанных в соединения оксидов кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия, серы.

Таблица 1

Химический состав исходного техногенного сырья, вес. %

Наименование пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O + K ₂ O	п.п.п.*
Горелая порода	59,63	19,67	5,31	1,24	2,03	1,0	2,30	4,00	4,75
Зола уноса	51,27	22,49	9,32	2,95	1,69	0,95	0,93	4,67	5,63
Топливный лак	53,88	24,40	11,20	2,40	2,15	0,56	0,50	3,89	0,97

* Потери при прокаливании.

В составе горелой породы и золошлаковых материалов можно выделить кристаллические, стекловидные и органические вещества. По результатам физико-минералогических исследований кристаллическое вещество представлено кварцем различных модификаций, магнетитом, гематитом, муллитом. Из минералов, являющихся новообразованиями, отмечаются силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция, подобные минералам цементного камня.

Большинство горелых пород, имеющихся в Ростовской обл., по литологическому составу являются глинистыми. Породный отвал шахты «Майская» относится к песчанисто-глинистым [6, 7], содержание песчаника составляет от 10 до 30 %. Породы отвала сложены в основном смесью аргиллитов, алевролитов, песчаника. В обожженных алевролитах и аргиллитах термическим воздействием подвергается в основном глинистое вещество. Глинистое вещество изменено в процессе самообжига. В золошлаковых материалах и в горелой породе глинистое вещество при обжиге в разной степени аморфизовано, обезвожено. Аморфизация происходит в результате деформации и разрушения кристаллической решетки минералов при высокотемпературном обжиге. Преобладающий в составе минеральных компонентов каолинит дегидратируется до аморфизованного метакаолинита. Зола также включает продукты обжига глинистых минералов. Их частицы также аморфизованы. При сжигании угля ряд термохимических превращений не успевает завершиться до наступления равновесного состояния. Продуктом такого незавершенного процесса является стекловидная фаза переменного состава. Она составляет существенную часть, особенно в золах кислого состава. Продукты глинистых минералов занимают промежуточное положение между кристаллической и стекловидной группами веществ. Несгоревшие частицы топлива, присутствующие в золошлаковых отходах и породной массе горелых пород в качестве примесей, в разной степени аморфизованы, отличны от исходного твердого топлива и находятся в виде продуктов коксования и графитизированного углистого вещества. Эти вещества стойки к окислению и воздействиям внешней среды.

Тонкодисперсная зола уноса с удельной поверхностью 350 м²/кг использовалась в качестве мелкодисперсной добавки. Отсеи дробления горелых пород и золошлаковая смесь из золоотвалов применялись как мелкозернистые заполнители. Зерновой состав отсевов дробления регулируется на дробильно-сортировочной установке на шахте «Майская» на стадии подготовки горелых пород к использованию. В отсеве не содержатся глинистые и другие

засоряющие примеси, вредные включения. Фракция от 5 до 10 мм, содержащаяся в отсеве, имеет марку прочности не ниже 800.

Зола уноса – это дисперсный порошок, состоящий из мельчайших сферолитов размером от 0,001 до 0,14 мм. Топливный шлак состоит в основном из зерен крупностью от 0,14 до 10,0 мм. Шлаковая фракция в бетонах может выполнять роль мелкозернистого заполнителя. Гранулометрия золошлаковой смеси близка к оптимальной, если массовая доля зерен в ее составе находится в следующих пределах: 3–10 мм – 42–55%; 0,14–2,5 мм – 22–40%; фракция <0,14 мм (зола уноса) – 18–25%. Золошлаковая смесь не на всех участках отвала имеет оптимальную гранулометрию. Это связано с тем, что на золоотвалах практически не ведутся подготовка заполнителей из золошлакового сырья и поставка его потребителю. В исследованиях заполнители из горелых пород и золошлаковых смесей имели модуль крупности 2,0–2,2. В табл. 2 приведены составы мелкозернистого бетона, содержащего техногенное сырье. Составы предназначены для изготовления тротуарных плит и элементов мощения дорог, городских улиц и тротуаров.

Таблица 2

Составы мелкозернистого бетона, содержащего техногенное сырье

Номер состава	Содержание компонентов, кг/м ³					Экономия цемента, %
	Цемент	Зола уноса	Золошлаковая смесь	Отсев дробления горелых пород	Песок	
1	500	200	–	1570	–	43,8
2	600	150	1520	–	–	32,6
3	700	–	1570	–	–	21,3
4	600	150	–	1520	–	32,6
5	500	200	1570	–	–	43,8
Контроль	890	–	–	–	1520	–

Бетонная смесь для изготовления тротуарных плит отличается пониженным водоцементным отношением: 0,24–0,25. Введение золы уноса позволяет улучшить удобоукладываемость жестких бетонных смесей, снизить расход цемента, уменьшить пустотность на 3–7%, водопотребность – на 5–7%. Особо плотные и прочные бетоны классов В22.5–В40 получены по технологии вибропрессования (виброштампованием). Набор прочности мелкозернистого бетона на техногенном сырье может происходить как в условиях нормального твердения при относительной влажности не менее 90% и температуре 20(±2) °C, так и при тепловлажностной обработке. Как следует из опыта, пущцолановая активность золошлаковых материалов и горелых пород в наибольшей степени проявляется при термообработке. Оптимальный режим термообработки: выдержка свежеотформованных изделий – не менее 2 ч, подъем температуры до начала изотермического прогрева – 3 ч, выдержка при температуре изотермического прогрева – 8 ч, охлаждение изделий – не менее 3 ч. Температура изотермического прогрева должна составлять не менее 80–85 °C.

В заводских условиях были выпущены опытные партии тротуарных плит. В производственных условиях изготовление контрольных кубов производилось параллельно с изготовлением изделий из тех же бетонных смесей и при тех же условиях формования и термообработки. Контроль прочности и других показателей физико-механических свойств бетона проводился на плитах методом неразрушающего контроля и на кубах-образцах по методикам, приведенным в нормативных документах. Физико-механические свойства бетонов тротуарных плит приведены в табл. 3

Таблица 3

Физико-механические свойства мелкозернистых бетонов тротуарных плит

Номер состава	Прочность, МПа		Морозостойкость, марка	Водопоглощение, %	Истираемость, г/см ²				
	Твердение, сут.				Абразив				
	28	180			вольский песок	корунд	мраморная крошка		
1	43,8	71,7	F300	2,34	0,332	0,767	0,682		
2	41,2	50,3	F300	2,77	0,337	0,880	0,792		
3	35,9	42,0	F300	3,05	0,417	0,994	0,853		
4	45,4	61,7	F300	2,15	0,308	0,772	0,694		
5	42,5	54,8	F300	3,23	0,317	0,745	0,703		

Золошлаковые материалы и горелые породы положительно влияют на свойства и качество изделий на их основе. Тротуарная плитка имеет класс бетона по прочности на сжатие В30–В50, по морозостойкости – F300, практически без снижения прочности при испытании на морозостойкость. Наилучшие показатели физико-механических свойств получены для составов, содержащих одновременно золу и горелую породу в виде отсевов дробления. Золошлаковые материалы и горелые породы в силу своего происхождения имеют в своем составе активные компоненты, способные взаимодействовать с продуктами гидратации цемента и образовывать дополнительное количество гидросиликатов кальция различной основности. При совместном нахождении в системе механизм их действия в бетонной смеси усиливается (синергетический эффект).

Из данных табл. 3 следует, что исследуемые бетоны после достижения начальной прочности (в 28 сут.) продолжают в течение длительного времени набирать прочность. Достигнутая через полгода прочность превышает первоначальную в 1,17–1,74 раза. Наличием пуццолановой активности объясняется способность таких смешанных композиций продолжать в течение длительного времени набирать прочность после достижения проектной. Меньшая прочность в начальные сроки твердения по сравнению с бетонами на традиционных материалах компенсируется более высокой прочностью в поздние сроки.

Для получения изделий отличного качества очень важно при вибропрессовании соблюдать заданное водоцементное отношение (В/Ц). Тротуарные плиты формовали из жестких смесей с низким водоцементным отношением, равным 0,25. В исследованиях Н.А. Рыбьева [8], изучавшего особенности формирования структуры и свойств цементного камня при уплотнении прессованием, установлено, что цементный камень имеет наибольшую прочность и плотность при оптимальном В/Ц. Значение оптимального В/Ц составило 0,24. Изучение структуры цементного камня с использованием растрового электронного микроскопа показало, что при оптимальном В/Ц цементный камень характеризуется плотной качественной структурой, свидетельствующей о том, что в процессе прессования вся жидкость переведена в пленочное состояние, причем пленки имеют минимальную толщину и являются непрерывными. Цементный камень при оптимальном водоцементном отношении характеризуется наибольшей скоростью структурообразования и не только имеет более плотную структуру, но и более стоек к коррозии и температурным воздействиям.

Бетоны, содержащие техногенное сырье (золошлаковые отходы или горелые шахтные породы), имеют высокие показатели прочности при изгибе. На рис. 1 показана зависимость прочности при изгибе от прочности на сжатие для трех видов бетона: золобетона (кривая 1),

горелопородного (кривая 2) и бетона на традиционных материалах (кривая 3 – контроль). Наибольшие значения прочности при изгибе имеет золобетон, наименьшие – обычный бетон. Повышенная прочность золобетона связана с выраженным пластифицирующим эффектом золы, что способствует формированию более однородной и плотной структуры бетона.

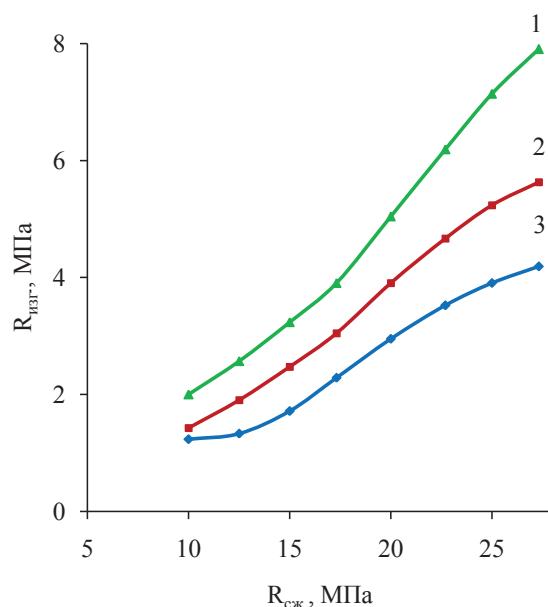


Рис. 1. Зависимость прочности бетона при изгибе от его прочности на сжатие:
1 – золобетон; 2 – горелопородный бетон;
3 – обычный бетон (контроль)

Другой отличительной особенностью бетонов на техногенном сырье является повышенная сульфатостойкость. Наблюдения за расширением образцов при попаременном насыщении в растворе сульфата натрия и высушивании показывают, что у золо- и горелопородных бетонов деформации, сравнимые по величине с деформациями обычных бетонов, появляются при значительно большем количестве циклов испытаний. На рис. 2 кривая для обычного бетона располагается левее и имеет более крутой подъем, чем кривые для бетонов с золой и горелой породой. Влияние зол и горелых пород на сульфатостойкость бетонов имеет физический и химический характер. Физическая природа этого явления связана с относительным увеличением контактов между частицами и формированием более однородной и плотной структуры бетона. Физико-химический характер обусловлен пущцолановыми свойствами, которые способны проявлять золошлаковые отходы и горелые породы. Результатом проявления пущцолановой активности является связывание минеральными добавками свободной извести, образующейся при гидратации цемента и образованием значительного количества цементирующих веществ. Контактный слой при этом имеет более развитую и менее дефектную поверхность, более стойкую к деформационным проявлениям и воздействию агрессивных сред.

Положительное влияние золошлаковых материалов и горелых пород на физико-механические свойства бетонов, а также возникающая при их применении возможность существенно сокращать расход цемента (до 45 %) без ухудшения свойств и качества бетона

дают основание рекомендовать их для широкого использования в технологии бетона. По полученным показателям прочности, морозостойкости, истираемости, коррозионной стойкости, стойкости к попеременному увлажнению и высушиванию и другим свойствам эти бетоны можно рекомендовать для производства тротуарной плитки, бортовых камней, облицовочных плит, искусственной брусчатки, бетонной черепицы и других мелкоштучных изделий.

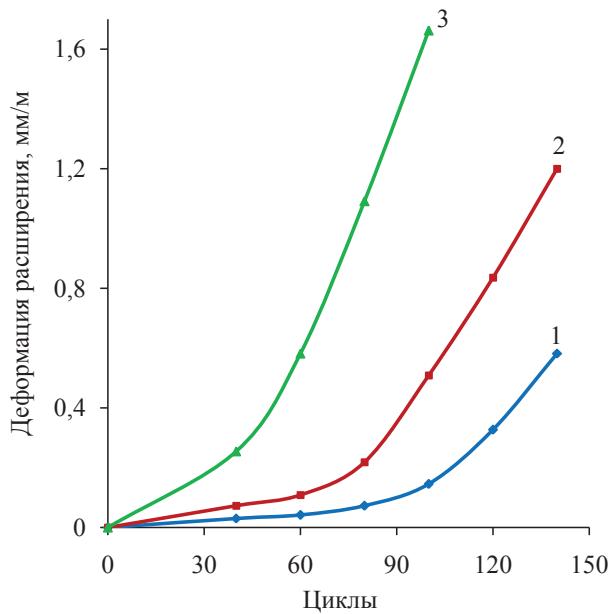


Рис. 2. Кинетика развития линейных деформаций бетона при циклических испытаниях в растворе Na_2SO_4 :

1 — состав с добавкой горелой породы;
2 — состав с добавкой золы; 3 — контрольный состав

Для изготовления тротуарной плитки и других мелкоштучных изделий в России многие фирмы (например, «РИФЕЙ» — ООО «Завод «Стройтехника», ООО «Интэк», ООО «Вибропресс», Группа компаний «Тулапрессмаш» и др.) проектируют и производят высокотехнологичное вибропрессовое оборудование и универсальные линии. Оборудование не уступает по качеству и надежности зарубежным аналогам и имеет преимущества: простое управление и обслуживание, применение однотипных недефицитных комплектующих, высокую компактность, возможность быстрой переналадки линии на другой вид изделия путем смены матриц. С помощью одной линии путем несложной и нетрудоемкой переналадки оборудования (пресс-форм) можно изготавливать различные виды изделий: оригинальные стеновые блоки, самоблокирующиеся каменные блоки для дорожного покрытия, облицовочные плиты, дорожные бордюры, фигурные тротуарные плитки, черепицу и другие изделия. Возможен выпуск изделий с фактурным слоем с добавкой красителей и с фактурой под природный камень.

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

Список литературы

1. Гольденберг Л.Б., Оганесянц С.Л. Применение зол ТЭЦ для улучшения свойств мелкозернистых бетонов // Бетон и железобетон. 1987. № 1. С. 15–17.
2. Балабанов В.Б., Николаенко В.П. Применение зольных отходов в дорожном строительстве // Вестник ИрГТУ. 2011. № 6 (53) С. 37–41.
3. Чумаченко Н.Г., Тюрников В.В., Сейкин А.И., Баннова С.Е. Возможности использования горелых пород в строительстве // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 11. С. 41–46.
4. Федорова Н.В., Шафорост Д.А. Перспективы использования золы-уноса тепловых электростанций Ростовской области // Теплоэнергетика. 2015. № 1. С. 53–58.
5. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Опыт применения горелых пород шахтных отвалов в дорожном строительстве // Экологический вестник России. 2018. № 5. С. 42–47.
6. Смирнов Б.В., Трунов Б.Д., Труфанов В.Н., Шамрай И.А. Литолого-петрографические особенности пучащих пород Восточного Донбасса. Геологическое строение Ростовской и сопредельных областей. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1972. С. 68–69.
7. Трунов Б.Д. Методические рекомендации по изучению и использованию в народном хозяйстве породных отвалов угольных шахт Ростовской области. Ростов н/Д, 1987. 58 с.
8. Рыбьев И.А., Соколов В.Г. Особенности формирования структуры и свойств цементного камня при уплотнении прессованием // Изв. вузов. Строительство. 1992. № 5–6. С. 61–64.

References

1. Goldenberg L.B., Oganesyants S.L. (1987) The use of ash from thermal power plants to improve the properties of fine-grained concrete. Concrete and reinforced concrete. No. 1. P. 15–17.
2. Balabanov V.B., Nikolaenko V.P. (2011) The use of ash waste in road construction. Bulletin of ISTU. No. 6 (53) P. 37–41.
3. Chumachenko N.G., Tyurnikov V.V., Seikin A.I., Bannova S.E. (2015) Possibilities of using burnt rocks in construction. Ecology and Industry of Russia. Vol. 19. No. 11. P. 41–46.
4. Fedorova N.V., Shaforost D.A. (2015) Prospects for the use of fly ash from thermal power plants in the Rostov region. Teploenergetika. No. 1. P. 53–58.
5. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. (2018) Experience of using burnt rocks of mine dumps in road construction. Ecological Bulletin of Russia. No. 5. P. 42–47.
6. Smirnov B.V., Trunov B.D., Trufanov V.N., Shamray I.A. (1972) Lithological and petrographic features of the heaving rocks of the Eastern Donbass. Geological structure of Rostov and adjacent regions. Rostov-on-Don: Publishing house of the Russian State University. P. 68–69.
7. Trunov B.D. (1987) Methodical recommendations for the study and use in the national economy of waste dumps of coal mines in the Rostov region. Rostov-on-Don. P. 58.
8. Rybiev I.A., Sokolov V.G. (1992) Features of the formation of the structure and properties of cement stone during compaction by pressing. News of the universities. Building. No. 5–6. P. 61–64.