

УДК 628.52

## РАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА УТИЛИЗАЦИИ СЕРНОГО АНГИДРИДА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭС

**В.И. Турчанинов<sup>1</sup>, В.В. Кабанова<sup>2</sup>, Д.С. Махина<sup>3</sup>**

Оренбургский государственный университет, Российская Федерация

e-mail: <sup>1</sup> [tutuche@mail.ru](mailto:tutuche@mail.ru), <sup>2</sup> lera.kabanova.1997@mail.ru, <sup>3</sup> dasha15\_96@mail.ru

*Рассмотрены планетарные проблемы загрязнения атмосферы земли оксидами серы, образующимися при сжигании топлива, содержащего серу, а также при переработке сульфидного сырья. Проанализированы технологии улавливания оксидов серы с последующим производством из продуктов очистки гипсовых вяжущих. Приведены результаты эксперимента, подтверждающие необходимость предварительной очистки дымовых газов от пыли с целью получения качественных гипсовых вяжущих. Проведены расчеты, показывающие целесообразность строительства предприятий по производству гипсовых вяжущих из продуктов очистки дымовых газов.*

**Ключевые слова:** оксиды серы, серосодержащее топливо и сырье, десульфурация, гипсовые вяжущие.

## RATIONAL UTILIZATION SCHEME OF SULFUR ANHYDRIDE OF TPP FLUE GASES

**V. Turchaninov<sup>1</sup>, V. Kabanova<sup>2</sup>, D. Mahina<sup>3</sup>**

Orenburg State University, Russian Federation

<sup>1</sup> [tutuche@mail.ru](mailto:tutuche@mail.ru), <sup>2</sup> lera.kabanova.1997@mail.ru, <sup>3</sup> dasha15\_96@mail.ru

*Work considers the planetary problems of the earth's atmosphere pollution with sulfur oxides, which are formed during the combustion of fuel containing sulfur, as well as during the processing of sulfide raw materials. Sulfur oxides capture technologies with the subsequent production from the products of cleaning gypsum binders are analyzed. Results of the experiment confirming the need for preliminary cleaning of flue gases from dust in order to obtain high-quality gypsum binders are presented. Calculations showing the feasibility of building enterprises for the production of gypsum binders from flue gas purification products are carried out.*

**Keywords:** sulfur oxides, sulfur-containing fuel and raw materials, desulfurization, gypsum binders.

В настоящее время глобальный характер приобретает проблема загрязнения атмосферного воздуха за счёт выбросов серного ангидрида. При сжигании серосодержащего топлива образуется два оксида серы: сернистый ангидрид ( $SO_2$ ) и серный ангидрид ( $SO_3$ ).

По данным Greenpeace за 2018 г первое место в рейтинге стран по выбросам в атмосферу диоксида серы занимает Индия с объемом 4586 тыс. т в год, на втором месте Россия (3683 тыс. т), на третьей строчке Китай (2578 тыс.т). Далее следуют Мексика, Иран и Саудовская Аравия и ЮАР, также превысившие отметку в 1000 тыс. т. Всего выброс серного ангидрида этими странами составляет – 16,5 млн. тонн в год [1].

Общепланетарное техногенное поступление диоксида серы в атмосферу, по разным источникам, составляет в среднем от 140 до 290 млн. т в год.

Диоксид серы и образующиеся при его взаимодействии с водяными парами атмосферы сернистая  $H_2SO_3$  и серная  $H_2SO_4$  кислоты негативно влияют на биотические составляющие

планеты (растения, животных, людей). Наблюдается гибель деревьев, особенно хвойных, снижается урожайность сельскохозяйственных культур, закисление почв, интоксикация животных. Люди страдают респираторными заболеваниями, поражаются легкие [2].

Предельно-допустимая концентрация (ПДК) серного ангидрида в атмосферном воздухе: максимально-разовая — 0,5 мг/м<sup>3</sup>, среднесуточная — 0,05 мг/м<sup>3</sup>; в помещении (рабочая зона) — 10 мг/м<sup>3</sup> [3].

Следует отметить, что негативное воздействие серного ангидрида наблюдается не только вблизи источника его образования, но и на значительном расстоянии от него, т.к. распространение дымовых газов наблюдается на 300-400 км, а в ряде случаев, при установке высоких дымовых труб, и до 1-2 тыс. км. Поэтому даже благополучные в экологическом отношении Швейцария, Люксембург, Нидерланды страдают от выбросов газов промышленных предприятий Рурского бассейна Германии и Великобритании.

Техногенными источниками поступления оксидов серы в атмосферы являются: топливная энергетика – 55%; металлургия – 25%; очистка и переработка угля и нефти – 10 %; химическая промышленность, транспорт и прочие виды хозяйственной деятельности человека – 10%. Таким образом первоочередное внимание должно быть уделено очистке дымовых газов тепловых электростанций (ТЭС).

Как нами ранее отмечалось [4], наиболее целесообразным методом снижения концентрации SO<sub>2</sub> является десульфурация или процесс обессеривания дымовых газов. Продукт, полученный после промышленной переработки, представляет собой двухводный сульфат кальция  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  имеет те же характеристики, что и природный гипс, и является высококачественным и экологически чистым продуктом.

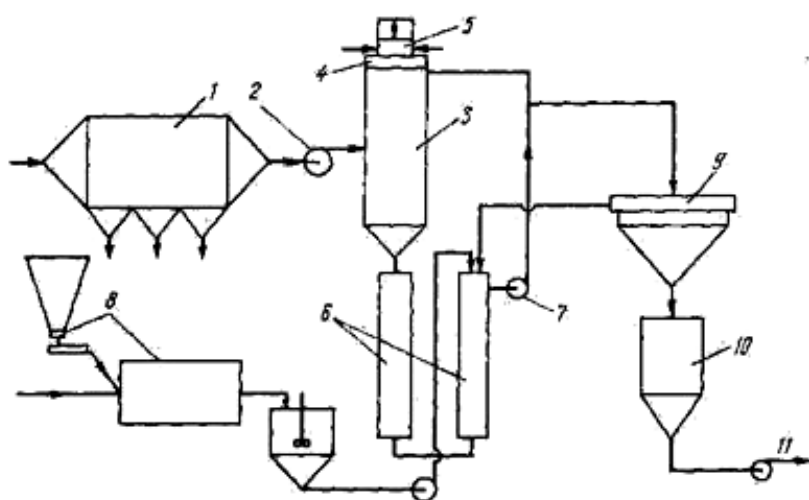
Десульфурация может осуществляться мокрым, полусухим и сухим методами. Наибольшее распространение получила мокрая технология вследствие её наибольшей эффективности и простоты.

В мокрых технологиях очистка дымовых газов от оксидов серы осуществляется путем промывки отходящих газов водной суспензией извести либо известняка. При этом улавливаемый диоксид серы растворяется в воде, что способствует максимальному ускорению его связывания с реагентом. При этом образуются сульфит и сульфат кальция; в последующем за счёт дополнительной подачи воздуха сульфит окисляется до двухводного сульфата (гипса).

Нам представляется более целесообразным для улавливания оксидов серы использовать суспензию извести, нежели известняка. При гашении извести образуются частицы гидроксида кальция  $Ca(OH)_2$  размером частиц около 1 мкм, в то время как при приготовлении известняковой суспензии способом мокрого помола, даже при полном прохождении её через сито №008, средний размер частиц известняка будет составлять от 20 до 30 мкм. К тому же при гашении извести примесные компоненты не прогашиваются и в виде крупных включений могут быть отделены от суспензии гидроксида кальция. А вот при помоле известняка все примесные компоненты входят в состав суспензии, тем самым снижая её активность и приводя к получению двухводного сульфата со значительным количеством примесей. Поэтому и качество гипсового вяжущего получаемого из такого двухводного сульфата будет более низким при использовании известняковой суспензии.

Схема очистки дымовых газов от диоксида серы известковым способом приведена на рисунке 1.

Следует отметить, что на ТЭС главным образом применяют мокрую очистку дымовых газов, используя в качестве пылеосадительных аппаратов гидроциклоны либо скрубберы Вентури. Такая технология более проста и менее затратна, но она не позволяет достаточно полно извлекать оксиды серы из дымовых газов и улучшать экологическую обстановку региона и планеты в целом.



1 – золоуловитель; 2 – дымосос; 3 – скруббер; 4 – брызгоуловитель; 5 – подогреватель; 6 – емкости;  
7 – циркуляционный насос; 8 – газовая установка; 9 – сгуститель; 10 – емкость для шлама;  
11 – сброс шлама на переработку или на золоотвал

Рисунок 1. – Принципиальная схема очистки дымовых газов от диоксида серы известковым способом

Сухая пылеочистка посредством циклонов недостаточно эффективна вследствие низкой степени очистки такими аппаратами – 60–70 %. Если после циклонов газовый поток направлять на извлечение оксидов серы, то получаемый гипс будет характеризоваться значительным содержанием примесей золы и качество гипсовых вяжущих на его основе будет низким.

Нами был проведен эксперимент с целью установления влияния инертных примесей на свойства строительного гипса. С этой целью были изготовлены 3 серии образцов из строительный гипса с добавкой инертного наполнителя – грубомолотого кварцевого песка. Результаты эксперимента представлены в таблице 1. Определение прочностных показателей проводили на воздушно-сухих образцах.

Таблица 1. – Влияние добавки наполнителя на свойства гипса

№ составов	Содержание наполнителя, в %	Нормальная густота, в %	Предел прочности, кг/см <sup>2</sup>	
			при изгибе	при сжатии
1	0	67	53,8	168,5
2	10	63	51,3	137,8
3	20	56	46,9	113,7

С целью установления чистоты гипса образцы 1 состава после определения их прочностных характеристик были испытаны по ГОСТ 4013-82 [5]. Путем нагрева пробы массой 1 г в муфельной печи при температуре (400±15) °С в течение 1 ч было установлено, что содержание  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  в исходном гипсовом камне, из которого было изготовлено вяжущее, составляло 89,88 %. Результаты эксперимента, представленные в таблице 1, позволяют сделать вывод о необходимости высокой степени очистки дымовых газов перед направлением их на извлечение оксидов серы.

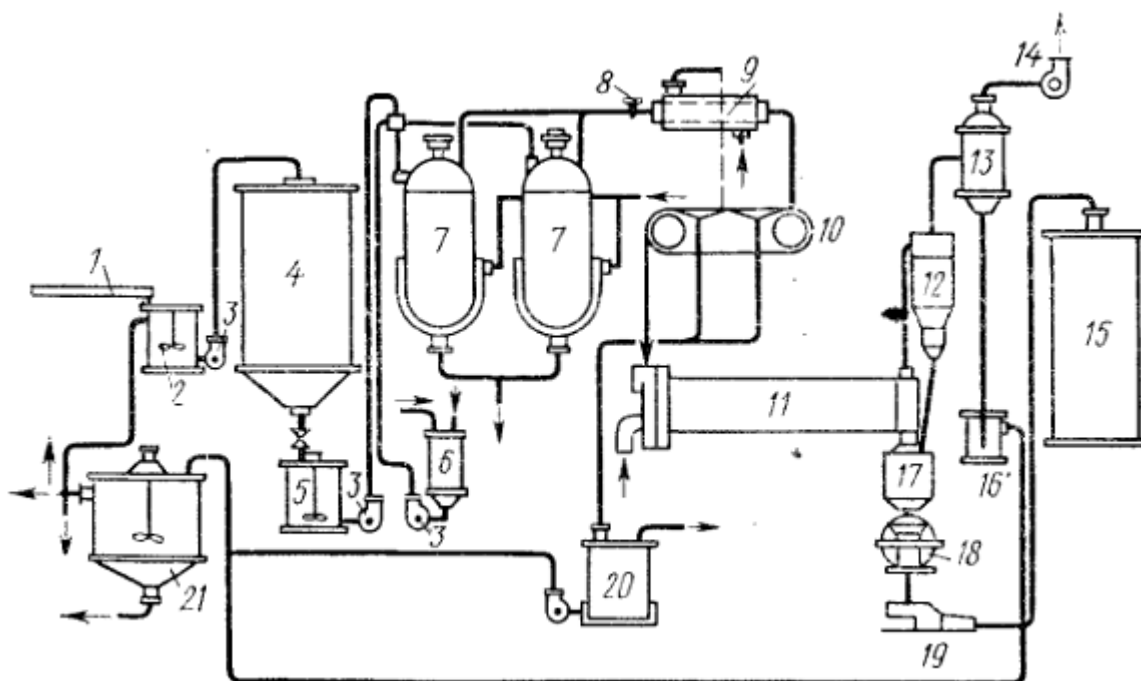
Этим требованиям отвечают электрофильтры, степень очистки в которых составляет 95-99 %. На рисунке 1, поз. 1, представлен электрофильтр. Кстати зола сухого отбора практически полностью используется при производстве цемента, бетона, в том числе ячеистого, в

то время как мокрого направляется в отвал и последующее её использование создаёт проблемы, особенно в зимнее время.

Двуводный гипс после установки десульфурации может использоваться в качестве добавки регулятора сроков схватывания при производстве портландцемента либо для получения гипсовых вяжущих.

Наиболее простой является технология производства строительного гипса путем обжига в варочных котлах. При этом гипсовая суспензия после сгущения направляется на вакуум-фильтр либо центрифугу, и далее после дробления и размола в мельницах с одновременной сушкой гипс направляется в варочный котел для обжига, в результате которого получают строительный гипс – β-полугидрат.

Большой интерес, на наш взгляд, представляет технология получения высокопрочного гипса – α-полугидрата. Производство его осуществляется либо по автоклавной технологии, либо варкой в жидких средах. Схема производства высокопрочного гипса по автоклавной технологии представлена на рисунке 2 [6].



- 1 - ленточный транспортер, 2 – репульпатор, 3 – центробежный насос, 4 – накопительная емкость, 5 – промежуточная емкость, 6 – специальная емкость, 7 – автоклав, 8 – трубопровод, 9 – теплообменник, 10 – вакуум-фильтр, 11 – сушильный барабан, 12 – циклон, 13 – скруббер, 14 – вентилятор, 15 – склад готовой продукции, 16 – промежуточная емкость, 17 – приемный бункер, 18 – мельница, 19 – пневмонасос, 20 – ресивер, 21 – отстойник-нейтрализатор

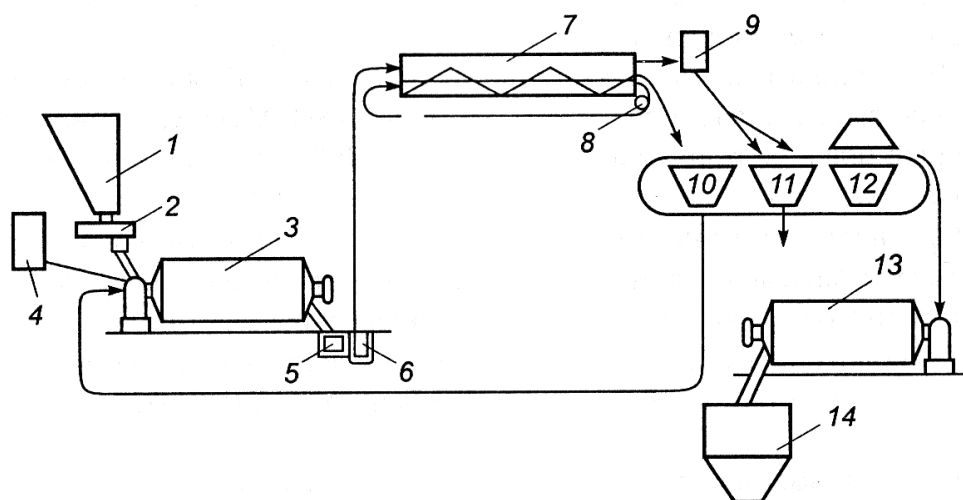
Рисунок 2. – Принципиальная технологическая схема переработки химического гипса в α-полугидрат сульфата кальция

Обработка дигидрата проводится в автоклаве непрерывного действия, в который гипс подается в виде шлама. Температура обработки составляет 150-175 °С, при давлении водяных паров 0,4-0,7 Мпа. При этом вода из дигидрата удаляется в капельно-жидком состоянии и формируются кристаллы α-полугидрата большего размера, нежели кристаллы β-полугидрат при варке в варочных котлах. Поэтому гипсовое вяжущее на основе α-полугидрата характеризуется меньшей водопотребностью и большей прочностью. Для регулирования процесса кри-

сталлизации  $\alpha$ -полугидрата в автоклав из емкости 6 подают «регулятор» кристаллизации полугидрата (РКП) в количестве 0,1% от массы исходного гипса. В качестве регулятора кристаллизации используют жидкое стекло или малеиновую кислоту, нейтрализованную поташом.

Затем суспензию обезвоживают в вакуум-фильтре до влажности около 10%, подвергают сушке в сушильном барабане и направляют на помол. Размолотый гипс пневмотранспортом направляют на склад готовой продукции.

Схема производства высокопрочного гипса варкой в жидких средах представлена на рисунке 3 [7].



- 1 – бункер, 2 – тарельчатый питатель, 3 – шаровая мельница, 4 – емкость для рабочего раствора, 5 – емкость, 6 и 8 – насосы, 7 – кристаллизатор с мешалкой, 9 – конденсатор, 10 – установка для фильтрации, 11 – емкость для промывки, 12 – сушка, 13 – мельница, 14 – бункер высокопрочного гипса

Рисунок 3. – Технологическая схема производства высокопрочного гипса в жидких средах

На рисунке 3 представлена схема получения высокопрочного гипса из гипсового камня. В этом случае его необходимо предварительно подвергать помолу. Но если использовать гипс, полученный при очистке дымовых газов ТЭС от оксидов серы, то гипсовый шлам от установки десульфурации может из накопительной емкости сразу направляться на варку в корытообразный кристаллизатор непрерывного действия с мешалкой, оснащенный подогревом.

Варка гипса осуществляется в растворах солей, имеющих температуру кипения более 100 °С. Рекомендуемый интервал температур – от 105 °С до 130 °С. Обычно используют растворы хлористого кальция, хлористого магния и сернокислого магния. При концентрации хлористого магния  $MgCl_2$  50 г на 100 г воды температура кипения раствора составляет 120,4 °С, а при концентрации раствора хлористого кальция  $CaCl_2$  100 г на 100 г воды температура кипения раствора – 129,7 °С. Более доступным является хлористый кальций и при его концентрации 25 г на 100 г воды температура кипения раствора – 105 °С, которой вполне достаточно для разложения  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  до  $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ .

Нами была осуществлена варка двухводного гипса, полученного измельчением образцов после определения прочностных характеристик строительного гипса. Варка осуществлялась в растворе  $CaCl_2$  при температуре 105 °С в течение двух часов. Полученный продукт был из-

мельчен до полного прохождения через сито № 02, а затем из него и контрольного исходного строительного гипса были изготовлены образцы-призмы размером 2x2x10 см.

Предел прочности, в кг/см<sup>2</sup>, при сжатии опытных образцов составил 117,5, а при изгибе - 49,5, в то время как для контрольных - 103 и 62,4 соответственно. Следует отметить, что полученный при варке в жидкой среде гипс характеризовался очень быстрым схватыванием, поэтому для получения достаточно подвижной массы количество воды затворения превысило нормальную густоту контрольного гипса: у опытного гипса В/Т=0,8, а у контрольного В/Т=0,67. Возможно это связано с недостаточно полной отмывкой продукта варки от  $CaCl_2$ , а возможно с очень тонким его измельчением. Но в любом случае в состав такого вяжущего при помоле следует вводить ПАВ, которые одновременно замедляют сроки схватывания гипса.

Реальность сооружения установки по производству гипсовых вяжущих по одной из рассмотренных технологий из гипсового шлама установки десульфурации дымовых газов ТЭС можно подтвердить на основе анализа работы ТЭС г. Красноярска.

На территории Красноярска находятся три ТЭС общей тепловой мощностью 3644 Гкал/ч. ТЭЦ-1 работает на буром угле Бородинского разреза, являющегося частью Канско-Ачинского угольного бассейна, расположенного на территории Красноярского края. Расход угля составляет 2560 тыс.т в год, при тепловой мощности станции 1677Гкал/ч. Химический состав угля, в %: S- 0,2; C- 43,7; H- 3; N- 0,6; O- 13,5; зольность - 6[8].

Общий расход угля по всем трем ТЭС с учетом их тепловой мощности составляет

$$\frac{3644}{1677} * 2560 = 5562,7 \text{ тыс. т.}$$

Содержание серы в угле  $0,002 * 5562,7 = 11125,4$  т.

Содержание серного ангидрида  $SO_3$  в угле с учетом атомных масс химических элементов  $2,5 * 11125,4 = 27813,5$  т.

Количество дигидрата  $CaSO_4 * 2H_2O$ , которое можно получить при десульфурации дымовых газов  $2,15 * 27813,5 = 59800$  т.

Таким образом, если организовать очистку дымовых газов Красноярских ТЭС от оксидов серы, то, наряду с улучшением экологической обстановки в этом крайне неблагоприятном с точки зрения экологии городе, здесь может быть организован выпуск гипсовых вяжущих на совместном для трех ТЭС производстве.

Подобные технологии очистки отходящих газов промышленных предприятий от оксидов серы с последующей переработкой гипсовых шламов в гипсовые вяжущие могут быть организованы повсеместно, где наблюдаются выбросы оксидов серы в атмосферу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Greenpeace выпустил мировой рейтинг источников диоксида серы [Электронный ресурс] // Greenpeace. Новость 19.08.2019. – Режим доступа: <https://greenpeace.ru/news/2019/08/19/17737/>, свободный. – Дата обращения: 21.10.2019.
2. Загрязнение биосферы диоксидами серы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.activestudy.info/>, - свободный. – Дата обращения: 15.03.2021.
3. ГН 2.1.6.3492-17 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/556185926> - свободный. – Дата обращения: 15.03.2021.

4. Турчанинов, В.И. Использование химического гипса в производстве строительных материалов / В.И. Турчанинов, В.В. Кабанова, Т.В. Лагизова. [Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон.опт. диск (CD-ROM).
5. ГОСТ 4013-82 Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2008.
6. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов : Учебник для вузов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычёв, В.В. Тимашев. – М.: Высш. школа, 1980. – с.51-52.
7. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общей ред. А.В. Ферронской. – М.: Издательство АСВ, 2004. - 488 с., с илл.
8. Родатис, К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф. Родатис, А.Н. Полторацкий – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с., с илл.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

*Текстовое электронное издание*

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2021

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Одобрено и рекомендовано в качестве электронного издания  
Советом инженерно-строительного факультета (протокол № 8 от 27.10.2021 г.)

**Редакционная коллегия:**

Д. Н. Лазовский (председатель), А. А. Бакатович, Е. Д. Лазовский,  
Л. М. Парфенова, Ю. В. Вишнякова, Р. М. Платонова, Е. Г. Кремнева, А. М. Хаткевич

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

[Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. III междунар. науч. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2021 г. / Полоц. гос. ун-т ; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-779-2.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.  
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018 г.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**№ госрегистрации 3671815379**

**ISBN 978-985-531-779-2**

©Полоцкий государственный университет, 2021

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

Технический редактор *И. Н. Чапкевич.*

Компьютерная верстка *А. А. Прадидовой, С. Е. Рясовой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

---

Подписано к использованию 16.11.2021.

Объем издания: 13 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 736.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>