

Исследование влияния золы рисовой шелухи на основные свойства цементного теста

П.Д. Тоболев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье рассмотрены экологические, экономические и технологические аспекты применения золы рисовой шелухи (ЗРШ) в строительной индустрии. Показано, что использование данного отхода рисоперерабатывающей промышленности способствует снижению углеродного следа и повышению качества цементного камня. Представлены результаты экспериментального исследования влияния ЗРШ на физико-механические свойства цементного теста. Определены закономерности изменения сроков схватывания, водопотребности, прочности и кинетики твердения при замещении части портландцемента на ЗРШ в количестве 5, 10, 15 и 20 % от массы цемента. Установлено, что оптимальное содержание добавки составляет 15% и обеспечивает улучшение прочностных свойств цементного камня в возрасте 28 сут. на 10% по сравнению с обычным цементом. Показано, что использование ЗРШ как частичной замены портландцемента представляет собой комплексное решение, объединяющее интересы строительной отрасли, аграрного сектора и охраны окружающей среды. Эта технология позволяет одновременно повышать качество строительных материалов, снижать затраты на строительство и уменьшать экологический след производства за счёт практического применения отходов, которые в настоящее время складируются на свалках или сжигаются нелегально, что в значительной степени загрязняют окружающую среду.

Ключевые слова: зола рисовой шелухи, портландцемент, цементное тесто, сроки схватывания, водопотребность, прочность, кинетика твердения, пущцолановая активность.

Введение

В условиях глобального роста объёмов строительства и ужесточения экологических требований особую значимость приобретают исследования по вовлечению промышленных и сельскохозяйственных отходов в производство строительных материалов. Одним из перспективных вторичных ресурсов является зола рисовой шелухи — побочный продукт переработки риса. Термическая утилизация шелухи приводит к образованию золы, содержащей аморфный диоксид кремния, что открывает перспективы её применения в строительной индустрии как активной минеральной добавки.

Мировое производство риса в 2023–2024 гг. превысило 780 млн. т. в год [1]. При этом выход рисовой шелухи составляет 20–25 % от массы зерна, что

формирует ежегодный поток отходов объёмом 150–200 млн. т. Традиционным способом утилизации рисовой шелухи является её открытое сжигание, что приводит к загрязнению атмосферы продуктами неполного сгорания, деградации почв вследствие накопления несгораемых остатков, а также к риску возникновения пожаров на свалках растительных отходов.

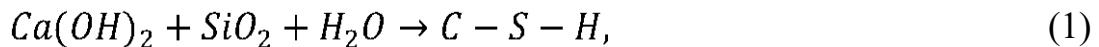
Использование ЗРШ в производстве строительных материалов позволяет минимизировать количество отходов за счёт вовлечения вторичного сырья и снизить потребность в первичных ресурсах, таких как цемент и минеральные добавки.

Производство портландцемента является одним из крупнейших источников антропогенных выбросов углекислого газа (CO_2), что составляет до 8 % глобальных выбросов [2]. Частичная замена цемента на ЗРШ позволяет сократить расход клинкера — основного источника выбросов CO_2 при обжиге известняка, снизить энергозатраты на производство единицы вяжущего, уменьшить транспортные нагрузки при локальном использовании ЗРШ. Экспериментальные данные показывают, что замена 10–20 % цемента на ЗРШ снижает выбросы CO_2 на 5–15 % без ухудшения эксплуатационных характеристик бетона [3].

ЗРШ является пущолановым отходом, который образуется при термическом сжигании рисовой шелухи во время переработки риса. Шелуха составляет около 20% от веса риса-сырца и является защитным покрытием рисовых зёрен. Его состав и плотность варьируются в зависимости от измерений. Рисовая шелуха состоит в основном из органических и неорганических материалов. В её состав входит кремнезём (15–20 %), лигнин (25–30 %) и целлюлоза (около 50 %). При сжигании шелуха превращается в золу с высоким аморфным содержанием кремнезёма (SiO_2), которая обладает высоким потенциалом вторичного использования, так как она очень реакционноспособна.

Производство рисовой шелухи можно разделить на два основных метода: неконтролируемое открытое сжигание и контролируемое сжигание. Неконтролируемое открытое сжигание предполагает сжигание рисовой шелухи на открытом воздухе при неопределенной температуре. Этот метод часто используется фермерами. Процесс длится более часа, и в результате получается рисовая шелуха, которая в основном используется в качестве почвенного удобрения. Однако в результате получается рисовая шелуха с высокой скоростью кристаллизации, что приводит к ухудшению пущолановых свойств. В отличие от этого, при контролируемом сжигании рисовая шелуха подвергается воздействию определённых температур, установленных в ходе экспериментальных исследований, направленных на улучшение характеристик рисовой шелухи. Этот метод позволяет получить рисовую шелуху с лучшими пущолановыми свойствами, что улучшает гидратацию цемента.

Высокое содержание аморфного SiO_2 (75–95 %) обеспечивает ЗРШ химическое взаимодействие с гидроксидом кальция ($Ca(OH)_2$) по уравнению реакции (1):



где C-S-H — гидросиликаты кальция, формирующие прочную матрицу цементного камня. Это позволяет использовать золу в качестве тонкодисперсной активной минеральной добавки в бетоны и строительные растворы, так как уплотняется структура цементного камня за счёт дополнительного образования C-S-H фаз, снижается проницаемость бетона и повышается сульфатостойкость и коррозионная устойчивость [4,5].

Средний размер частиц ЗРШ составляет 10-50 мкм, что позволяет ей выполнять функцию микронаполнителя, а именно - заполнять межзерновое пространство цементного теста, уменьшать капиллярную пористость, повышать плотность и однородность структуры [6-8].

Цель данного исследования — оценить возможность использования золы от сжигания рисовой шелухи в качестве пущолановой минеральной добавки к портландцементу, и изучить ее влияние на свойства цементного теста и камня.

Материалы и методы

В работе применены следующие материалы:

- портландцемент бездобавочный ЦЕМ 0 52,5Н, выпускаемый ООО «ХайдельбергЦемент Рус» (Новогуровский цементный завод), соответствует ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». Основные характеристики цемента: удельная поверхность — 3960 см²/г; время схватывания — начало через 205 минут, конец через 245 минут; нормальная густота цементного теста — 29 %. Прочность на сжатие: 29,5 МПа через 2 суток, 58,4 МПа через 28 суток. В таблицах №1 и 2 представлен химический и минералогический состав клинкера.

Таблица № 1

Химический состав клинкера ЦЕМ 0 52,5Н

Содержание компонентов, %						
1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃
21,65	5,05	3,65	66,37	1,32	0,63	3,09

Таблица № 2

Минералогический состав клинкера ЦЕМ 0 52,5Н

Содержание компонентов, %			
1	2	3	4
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
64	14	7	11

- зола рисовой шелухи (ЗРШ), химический состав которой представлен в таблице №3.

Таблица № 3

Химический состав ЗРШ

Содержание компонентов, %				
1	2	3	4	5
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
86,93	1,33	0,65	3,37	1,96

- вода согласно ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

Определение нормальной густоты цементного теста и сроков схватывания осуществлялось при помощи прибора Вика согласно методике ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема».

Прочность цементного камня определялась на образцах-кубах размером 20×20×20 мм, которые изготавливали из теста нормальной густоты. Перемешивание теста осуществлялось в автоматическом растворосмесителе, время перемешивания составило 3 минуты. Отформованные образцы хранились в камере нормального твердения в течение суток, а далее помещались в воду до достижения 28 суток при температуре 20±2°C. Определение прочностных показателей проводилось в возрасте 2, 7 и 28 сут. [9,10].

Результаты исследования

Для исследования влияния ЗРШ на свойства цементного теста были изготовлены составы с разным содержанием добавки, а в качестве контрольного образца был изготовлен состав без добавления ЗРШ. В таблице №4 приведены составы и их результаты по определению нормальной густоты и сроков схватывания.

Таблица № 4

Влияние количества ЗРШ на изменение водопотребности и сроков
схватывания цементного теста

№	ЗРШ, %	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин	
			начало	конец
1	2	3	4	5
1	0	29	205	245
2	5	33	210	250
3	10	36	215	260
4	15	40	220	265
5	20	44	225	270

Анализ представленных результатов в табл. №4 позволяет сделать вывод о том, что нормальная густота и время схватывания цементного теста увеличиваются с увеличением содержания ЗРШ.

На рис.1 представлены результаты испытания образцов цементного камня на сжатие в возрасте 2, 7 и 28 сут.

Рис. 1. – Прочность образцов цементного камня с ЗРШ при сжатии

Полученные результаты показывают, что ЗРШ оказывает влияние на процессы гидратации цементного теста - замедляет раннюю гидратацию клинкерных минералов (алита и белита), а также усиливает вторичные пущдолановые реакции в период 7–28 сут. Замещение портландцемента на ЗРШ в количестве до 15% способствует увеличению прочности цементного камня, а при добавлении 20% наблюдается спад прочности в 28 сут. на 3,5% по сравнению с добавкой в 15%. При введении 15% ЗРШ достигается наибольший прирост прочности цементного камня в 28 сут. - 64,5 МПа, что на 10% больше по сравнению с обычным цементом. Также наблюдается прирост прочности и при замещении 5 и 10% на 1 и 5%, соответственно, по сравнению с обычным цементом.

Заключение

По результатам приведенных испытаний можно утверждать, что частичная замена портландцемента на ЗРШ способствует улучшению

прочностных свойств цементного камня в возрасте 28 сут., но также необходимо отметить снижение начальной прочности по сравнению с обычным портландцементом.

Введение ЗРШ увеличивает сроки схватывания и водопотребность цементного теста. Поэтому, исследование влияния ЗРШ на свойства цементного камня имеет важное значение для экологии, экономики и развития строительных технологий. Оно способствует решению проблемы утилизации отходов, снижению затрат на производство бетона и улучшению его эксплуатационных характеристик. Однако необходимо учитывать высокую водопоглощающую способность ЗРШ, которая может снижать подвижность бетонной смеси, что негативно влияет на её удобоукладываемость. По этой причине рекомендуется использовать добавки, снижающие водопоглощение, или пластификаторы, которые улучшают текучесть смеси без ущерба для её структурных свойств.

Использование ЗРШ в составе цементных композиций позволяет трансформировать отходы сельскохозяйственного производства в ценный компонент цементных систем, одновременно решая задачи ресурсосбережения и экологической устойчивости.

Таким образом, внедрение ЗРШ в состав бетонов и других строительных смесей является перспективным направлением развития «зелёного» строительства и рационального использования вторичных ресурсов.

Литература

1. FAO Statistical Yearbook 2023–2024. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. P. 78.
 2. Global Cement and Concrete Association (GCCA). CO₂ and Energy Performance Report 2023. London, 2023. P. 21.
-

3. Singh L., Singh V. Rice husk ash as supplementary cementitious material: A review // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 280. P. 124321.
 4. Нго Суан Хунг, Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Ха Хоя Ки, Мельникова А.И. Влияние золы рисовой шелухи на свойства гидротехнических бетонов // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 6 (117). С. 768–777. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.6.768-777.
 5. Самченко С. В., Тоболев П. Д. Влияние сульфоалюмоферритного клинкера на раннюю прочность композиционного вяжущего // Промышленное и гражданское строительство. 2024. №6. С. 68 – 73. doi: 10.33622/0869-7019.2024.06.68-73.
 6. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Самоуплотняющийся бетон с частичной заменой цемента золой рисовой шелухи // Сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. Том 2. Москва, 2018. С. 322–331. DOI: 10.22337/9785432302663-322-331.
 7. Le, H.T., Nguyen, S.T. & Ludwig, HM. A Study on High Performance Fine-Grained Concrete Containing Rice Husk Ash // Int J Concr Struct Mater 8, 2014. 8, pp. 301–307. DOI: 10.1007/s40069-014-0078-z.
 8. Salas Montoya A., Chung C.-W., Kim J.-H. High performance concretes with highly reactive rice husk ash and silica fume // Materials. 2023. Vol. 16. P. 3903. DOI: 10.3390/ma16113903.
 9. Романенко И.М., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Козицын В.С. Влияние условий твердения бетона на прочностные показатели // Инженерный вестник Дона, 2022, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2022/7531/.
 10. Стенечкина К.С. Применение декоративных бетонов для отделки зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8272.
-



References

1. FAO Statistical Yearbook 2023–2024. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. P. 78.
2. Global Cement and Concrete Association (GCCA). CO₂ and Energy Performance Report 2023. London, 2023. P. 21.
3. Singh L., Singh V. A review Construction and Building Materials. 2021. Vol. 280. P. 124321.
4. Ngo Suan Xung, Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Xa Xoa Ki, Mel'nikova A.I. Vestnik MGSU. 2018. Т. 13. Vy`p. 6 (117). pp. 768–777. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.6.768-777.
5. Samchenko S. V., Tobolev P. D. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2024. №6. pp. 68 – 73. doi: 10.33622/0869-7019.2024.06.68-73.
6. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. Sbornik nauchny'x trudov Rossijskoj akademii arxitektury' i stroitel'ny'x nauk. Tom 2. Moskva, 2018. pp. 322–331. DOI: 10.22337/9785432302663-322-331.
7. Le, H.T., Nguyen, S.T. & Ludwig, HM. Int J Concr Struct Mater. 2014. 8, pp. 301–307. DOI: 10.1007/s40069-014-0078-z.
8. Salas Montoya A., Chung C.-W., Kim J.-H. Materials. 2023. Vol. 16. P. 3903. DOI: 10.3390/ma16113903.
9. Romanenko I.M., Petrovnina I.N., Elichev K.A., Kozicyn V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2022/7531/.
10. Stenechkina K.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8272.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 4.11.2025

Дата публикации: 27.12.2025