

**Модернизация цементного завода путем установки циклонного теплообменника для снижения углеродного следа**

*Озерова Н. В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент; Зиньков К. А.<sup>2</sup>; Якубов, А. С.<sup>3</sup>;  
Хмелев К. М.<sup>4</sup>*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1  
E-mail: <sup>1</sup>nozerova73@mail.ru, <sup>2</sup>kzinkiov2004@mail.ru, <sup>3</sup>yakubov2004@gmail.com,  
<sup>4</sup>kirill.khmelev.03@mail.ru*

**Аннотация.** Актуальность выбранной темы обусловлена растущими темпами жилищного строительства и возрастающей потребностью в цементе. В статье предложен способ модернизации цементного завода путем установки циклонного теплообменника для снижения углеродного следа в выбросах производства. Целями работы, описанными в данной статье, являются снижение себестоимости цемента, а также сокращение выбросов углекислого газа в атмосферу при его производстве. Обе задачи решаются за счет установки циклонного теплообменника, который позволяет уменьшить потребление ископаемого топлива, затрачиваемого на обжиг сырья. Для достижения целей были выполнены следующие задачи: Анализ эколого-экономических проблем цементной промышленности.

**Ключевые слова:** парниковые газы, декарбонизация в цементной промышленности, тепловая энергия отходящих газов, выбросы диоксида углерода в атмосферу.

**Modernization of the cement plant by installing a cyclone heat exchanger to reduce the carbon footprint**

*Ozerova N. V., Yakubov A. S., Zinkov K. A., Khmelev K. M.  
National Research University "MPEI"*

**Annotation.** The relevance of the chosen topic is due to the growing pace of housing construction and the increasing need for cement. The article suggests a way to modernize a cement plant by installing a cyclone heat exchanger to reduce the carbon footprint in production emissions. The objectives of the work described in this article are to reduce the cost of cement, as well as to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere during its production. Both tasks are solved by installing a cyclone heat exchanger, which reduces the consumption of fossil fuels spent on firing raw materials. To achieve the goals, the following tasks were performed: Analysis of ecological and economic problems of the cement industry.

**Keywords:** greenhouse gases, decarbonization in the cement industry, thermal energy of waste gases, carbon dioxide emissions into the atmosphere.

**Введение.** Строительная отрасль показывает устойчивые темпы развития как в России, так и в мире. Так в 2021 году в нашей стране был установлен новый рекорд по количеству квадратных метров построенного жилья – 92,6 млн. Однако уже в 2022 этот рекорд был побит – в эксплуатацию ввелись 101,5 млн. м<sup>2</sup> [1].

Понятие «углеродный след» включает в себя совокупность выбросов парниковых газов, прямо или косвенно произведенных на предприятии. Основными парниковыми газами являются углекислый газ, метан и закись азота. На каждом этапе производства цемента, от добычи, до переработки отходов независимо от типа используемой энергии присутствуют выбросы загрязняющих веществ, в том числе парниковых газов.

Производство цемента является одним из углеродоемких секторов мировой экономики, потребляя большое количество традиционного ископаемого топлива, карбонатного сырья и электроэнергии. Мировые выбросы диоксида углерода цементной промышленностью составляют 8 % от их общего количества. Цементная отрасль ответственна за 8 % мировых выбросов углекислого газа, что эквивалентно приблизительно 1400 млн. т углекислого газа в год [2]. В условиях стремительного роста цен на энергоресурсы, а также ужесточения климатической политики необходимо проводить масштабную комплексную модернизацию цементных заводов, с целью решения приоритетных проблем отрасли.

Только процессы декарбонизации на цементных заводах России являются источниками выбросов более чем 2 % от общего объема выброса углекислого газа в России [3; 4].

Рынок цемента в России является одним из самых крупных в мире, и многие местные и зарубежные компании внесли вклад в развитие цементной промышленности в стране. Однако, в последнее время, наблюдается рост цен на сырье и энергию, которые могут повлиять на дальнейшее развитие данной отрасли.

Цементная промышленность в России является важным элементом строительной индустрии и играет значительную роль в экономике страны. Россия является одним из крупнейших производителей цемента в мире, имеет множество крупных компаний.

Цементный рынок в России зависит от множества факторов, таких как экономические условия, доступность сырья и инфраструктуры, условия производства и экологические законы. В последние годы на рынке цемента в России наблюдались колебания, но в целом он остается динамичным и перспективным.

Важно отметить, что в цементной промышленности существует ряд экологических проблем, таких как выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, использование земельных ресурсов и повышение уровня загрязнения воды. Эти проблемы требуют решения, чтобы обеспечить «устойчивое» развитие цементной промышленности в России и сохранить состояние окружающей среды.

Более чем 30 лет цементная отрасль оставалась без серьезных изменений, несмотря на стремительно развивающиеся информационно-цифровые технологии и повышение технического потенциала страны. Для решения проблемы негативного воздействия на окружающую среду, в данной отрасли следует оценивать совокупное влияние различных факторов, от методов реализации технологического процесса до качества управления персоналом, работающих на предприятиях производства, транспортировки и фасовки цементной продукции.

Производство «сухим» способом требует более сложного и дорогостоящего оборудования, однако это позволяет обеспечить высокую производительность печного агрегата, что позволяет снизить энергоемкость цементного производства [5; 6].

На рис. 1 показан фрагмент генплана рассматриваемого предприятия. Сырьем для цемента служат карбонатные и глинистые породы, которые доставляются на завод железнодорожным транспортом. Они поступают в сырьевое отделение, где смешиваются в нужных пропорциях.

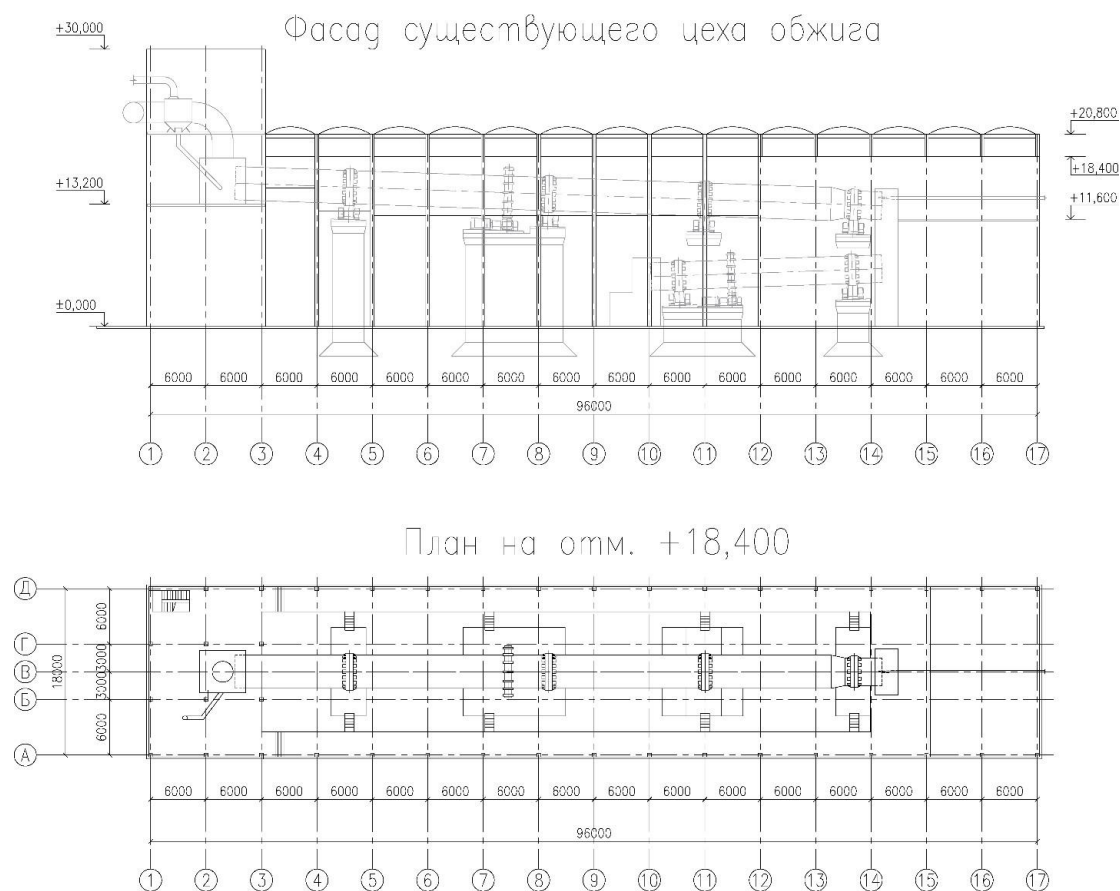


Рис. 1. Фрагмент генплана рассматриваемого предприятия  
 Fig. 1. A fragment of the general plan of the enterprise in question

В процессе помола в сырьевую смесь также могут вводиться корректирующие добавки. Добавки могут быть железосодержащими, кремнийсодержащими, алюмосодержащими или комбинированными. Пропорции сырья и добавок зависят от требуемого конечного качества цемента и от исходного химического состава сырья. Кроме того, в качестве сырья используется летучая зола, которая образуется как отход тепловых электростанций. Помол сырья происходит по сухому способу, то есть без добавления воды. Затем сырьевая смесь поступает в цех обжига, где при температуре около  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит ее спекание в цементный клинкер. Далее в этом же цеху клинкер охлаждается и поступает в цех помола, где его измельчают до состояния порошка, попутно вводя в небольшом количестве гипс. На данном этапе цемент готов, его упаковывают в мешки и отгружают потребителям.

Модернизация будет осуществляться в цеху обжига [7]. Рассмотрим схему его работы. Сырье попадает в загрузочный бак-дозатор, откуда с нужным расходом подается во вращающуюся печь длиной 70 м и диаметром 3,6 м. Внутри при температуре около  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит спекание сырья в цементный клинкер. Из печи клинкер попадает в холодильник барабанного типа, где он охлаждается до

температуры порядка 90 °С. Топливо в печь подается газовой горелкой. Отходящие газы направляются в электрофильтр, где происходит их обеспыливание, и затем в дымовые трубы, откуда они попадают в атмосферу.

Модернизация цеха обжига заключается в том, что в загрузочном отделении устанавливается циклонный теплообменник, который использует тепловую энергию отходящих газов для предварительного подогрева сырья. Соответственно, сырье, поступая в печь, уже нагрето до температуры около 800 °С и требует меньших затрат топлива для дальнейшего нагрева [8].

Был принят четырехступенчатый двухветвевой теплообменник. Он работает следующим образом: газы, отходящие из печи, поднимаются вверх по газоходам, проходя все ступени; сырье же подается из загрузочного бака сверху вниз, сначала оно попадает в газоход 4 ступени, где подхватывается восходящими газами и уносится в циклон 4 ступени. Там происходит теплообмен, сырье осаждается, по течке попадает в газоход 3 ступени, также подхватывается газом, попадает в циклон 3 ступени и так далее. С учетом размеров печи и ее производительности были рассчитаны геометрические параметры циклонов, а именно диаметры и высоты цилиндрических и конических частей, а также размеры входных и выходных патрубков [9].

Циклонный теплообменник опирается на металлическую этажерку, при этом у каждой ступени циклонов есть свой «этаж». Сама этажерка опирается на железобетонные колонны, верхняя отметка которых находится ниже вращающейся печи. Пространственная жесткость конструкции обеспечивается с помощью пространственных связей. Для определения геометрических параметров несущих конструкций был произведен поэтапный сбор нагрузок сверху вниз. Сначала была определена масса отдельных элементов циклонного теплообменника, а также его масса в целом, она оказалась чуть больше 2000 т.

Каждый циклон опирается на главные и две вспомогательные балки, которые в свою очередь и сами опираются на главные балки. Зная массу циклона и газохода, мы определили нагрузку на балки и выбрали их сечение в соответствии с ГОСТом. Также были выбраны сечения остальных балок. Есть балки, назовем их прогонами, которые держат только металлические листы перекрытия, которые нужны для обеспечения доступа персонала к оборудованию; есть балки, на которые эти прогоны опираются. Сечения всех балок – двутавры. С учетом массы всех балок на всех этажах, массы самого циклонного теплообменника, а также грузовых площадей колонн, были спроектированы три двутавровых сечения металлических колонн, представленных на рис. 2.

Далее с учетом нагрузки оборудования, временных нагрузок и нагрузки от металлической этажерки был сделан расчет на прочность и спроектированы железобетонные колонны, также в количестве 3 штук [10]. Все колонны имеют сечение 600х600 мм. В колонне, воспринимающей наибольшую нагрузку, используется бетон класса В45 и 8 стержней арматуры диаметром 28 мм, процент армирования 1,37. В двух других типах колонн используется бетон В25 и арматура диаметром 25 и 16 мм с процентами армирования 1,09 и 0,45 соответственно. Колонны монолитные, перекрытия также монолитные, стыковка арматуры колонн 1 и 2 яруса происходит путем выпуска арматуры нижней колонны с ее отгибом. Выпуски арматуры нижней колонны и арматура верхней колонны обвязываются хомутами.

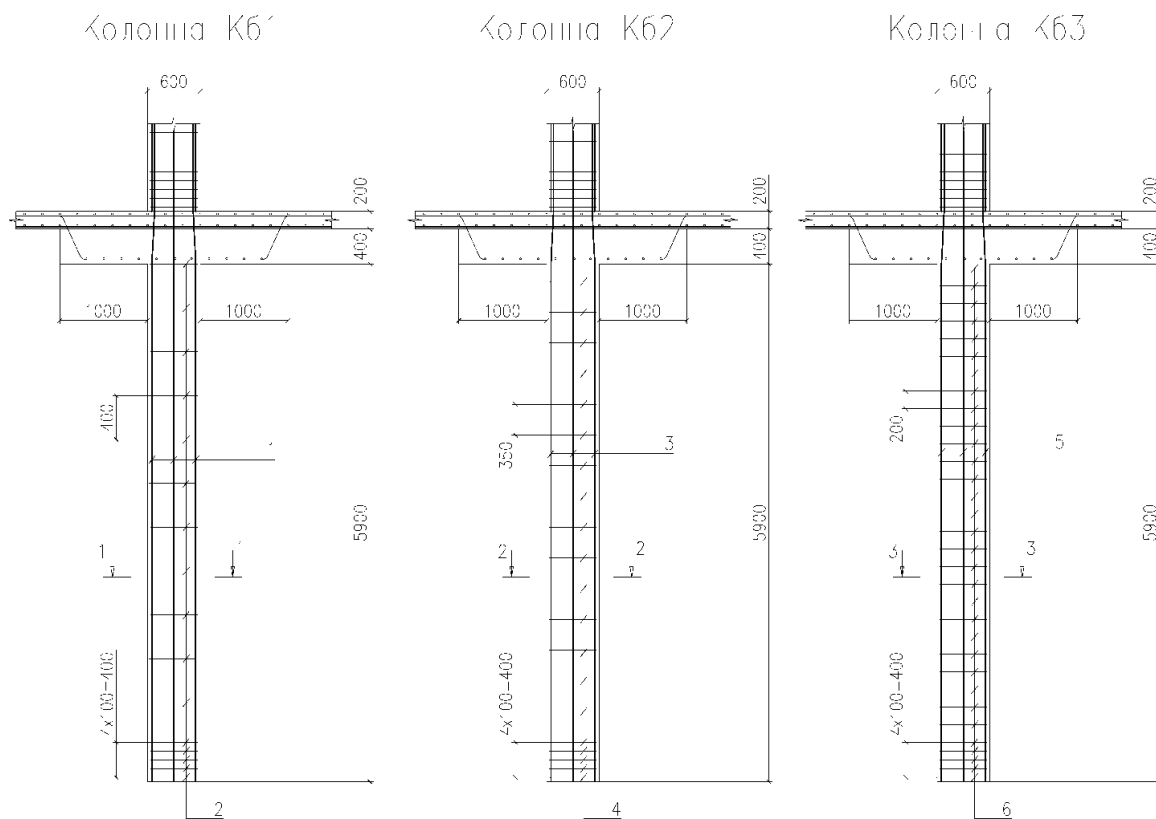


Рис. 2. Три двутавровых сечения металлических колонн  
 Fig. 2. Three i-beam sections of metal columns

Такой способ стыковки наиболее распространен как наиболее надежный и достаточно экономичный. Так как в приопорной зоне колонн возникает максимальная концентрация поперечных усилий, то для недопущения разрушения перекрытия, эти зоны необходимо усилить. Для этого были введены капители, которые также армируются. Арматура капителей отгибается в тело плиты [11].

Так как существующие конструкции не способны выдержать возросшую нагрузку, то необходимо произвести их полный демонтаж. Для этого был разработан проект производства работ краном. Так как реконструкция осуществляется на территории действующего предприятия, то условия осложняются необходимостью сохранения не только соседних зданий и сооружений, но и большей части конституций модернизируемого цеха. В стесненных условиях не представляется возможным произвести полный демонтаж автомобильным краном, поэтому целесообразно применение башенного крана. Демонтажные работы будут вестись поэлементным способом. Была составлена ведомость демонтируемых элементов и на ее основе подобран кран, который будет осуществлять демонтаж. Кран опирается на фундамент. При этом расстояние от башни крана до здания составляет 4 м, следовательно, безопасное расстояние соблюдено ( $4 > 0,7$  м). Поворот стрелы крана ограничивается так, чтобы не допустить ее столкновения с дымовыми трубами с одной стороны и обеспечить безопасное расстояние до соседнего цеха с другой. Помимо демонтажных работ краном, также необходимо разобрать кирпичную кладку в осях А3-А4 и Д3-Д4. В силу того, что в непосредственной близости находятся конструкции, повреждение которых недопустимо, разборка будет осуществляться ручным способом с применением отбойных молотков.

Работы по раскопке фундаментов будут совмещать ручной и механизированный труд. Размеры котлована определяются с учетом последующего устройства новых фундаментов. Земляные работы будут вестись экскаватором с ковшем объемом  $0,25 \text{ м}^3$ . Для разбора фундаментов будет применяться гидромолот, прикрепленный к стреле вышеупомянутого экскаватора. Строительный мусор будет вывозиться с помощью фронтального погрузчика и автосамосвала [12]. Подача цементного раствора при бетонировании фундаментов, колонн и перекрытий будет осуществляться тем же самым башенным краном, который вел демонтажные работы. Его характеристики в некоторой степени превышают требуемые для бетонирования, однако такое решение обусловлено тем, что в стесненных условиях невозможно применение автомобильного крана, а затраты на монтаж и демонтаж другого башенного крана с меньшим запасом по характеристикам значительно превысят выгоду по стоимости его эксплуатации. Тем не менее, перед началом бетонных работ с помощью телескопической клетки убираются три верхние секции башни и уменьшается высота подъема крюка. При этом расстояние от основания откоса котлована до фундамента крана превышает минимальное необходимое расстояние для выемок не глубже 2 метров в песчаных грунтах, соответственно безопасность обеспечивается.

На рис. 3, 4 изображены стройгенплан на период монтажных работ и его фрагмент.

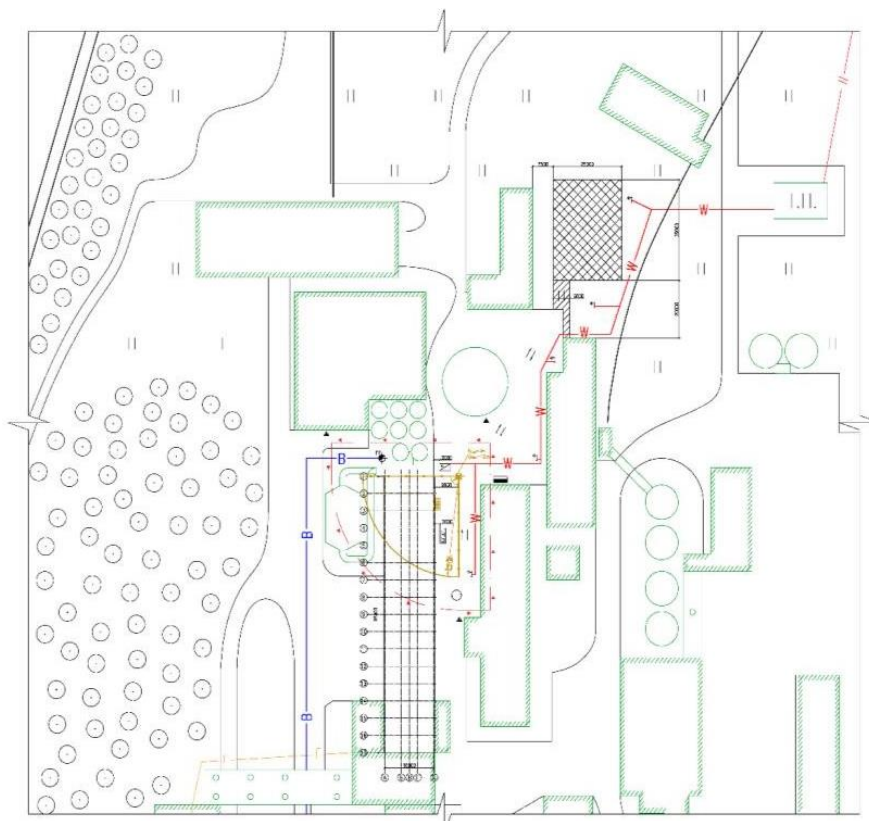


Рис. 3. Стройгенплан на период монтажных работ  
Fig. 3. Stroygenplan for the period of installation work

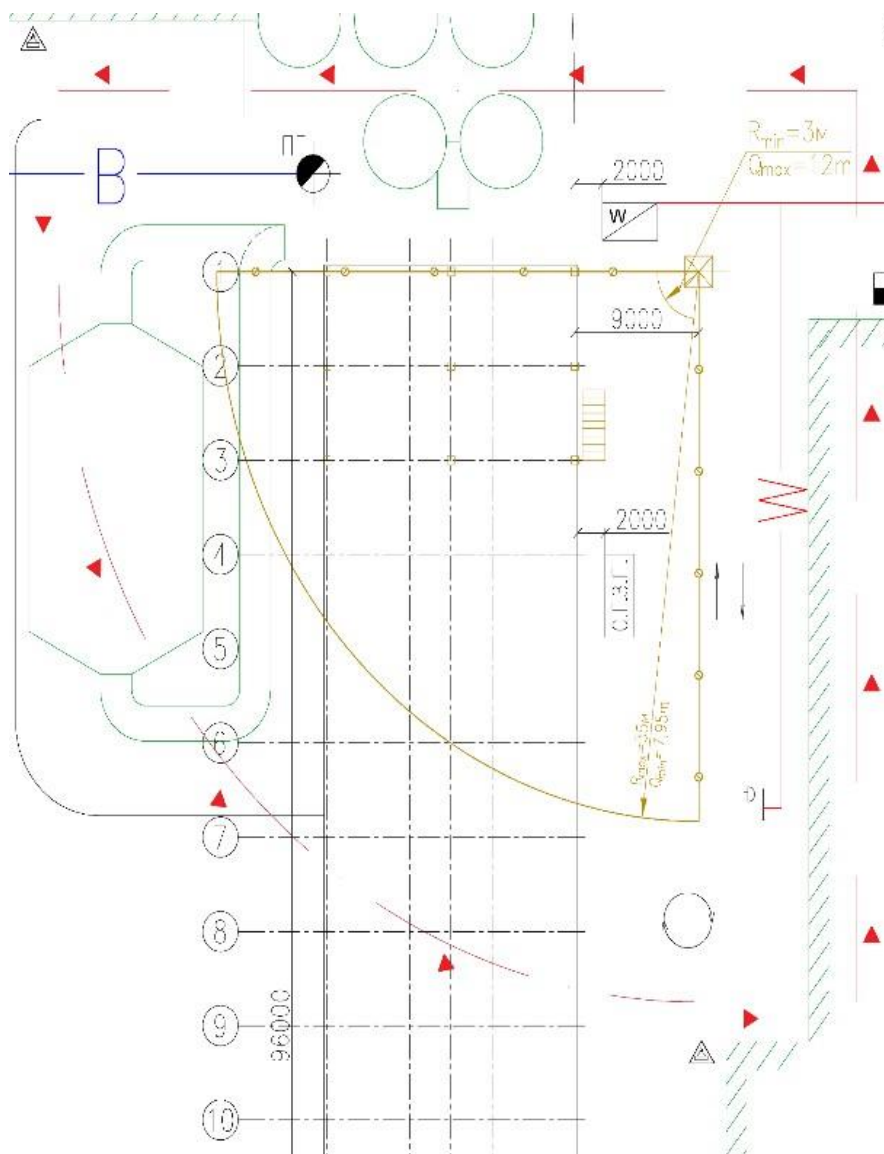


Рис. 4. Фрагмент стройгенплана в увеличенном масштабе  
 Fig. 4. Fragment of the construction plan on an enlarged scale

Строительные материалы доставляются на объект железнодорожным транспортом. В непосредственной близости от путей на пустой площадке организован склад, который соединен временной дорогой с существующей. От существующей трансформаторной подстанции спроектирована временная линия электроснабжения для питания строительных машин и механизмов, а также для освещения зон движения транспорта, по которым будет осуществляться доставка строительных конструкций со склада в зону действия монтажного крана. Также была рассчитана опасная зона работы крана, на ее границах размещены знаки, предупреждающие о начале опасной зоны. Для защиты от пожара был предусмотрен пожарный гидрант и временный наземный водопровод к нему, а также пожарный пост.

**Заключение.** Цементная промышленность не может избавиться от выбросов парниковых газов. Так как в основе технологического процесса лежит разложение карбонатов на оксиды и углекислый газ. Но снизить выбросы можно путем оптимизации процессов горения и использования энергоэффективных методов производства.

## Литература

1. Хуснуллин оценил прирост строительства в России по итогам 2022 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://realty.rbc.ru/news/63bec17a9a7947a49a1c4022>. – Дата доступа : 13.03.2023.
2. Lehne, J. Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete / J. Lehne, P. Felix. – The Royal Institute of International Affairs, 2018. – 138 p.
3. Озерова, Н. В. Парниковые газы и стройиндустрия / Н. В. Озерова, Д. Х. Мамина, М. М. Рукавишников // Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции (г. Москва, 14–15 октября 2021 г.) Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли. – 2021. – М. : Издательство МИСИ. – МГСУ. – 2021.
4. Голякова, У. А. Выбросы парниковых газов при производстве цемента / У. А. Голякова, Н. В. Озерова // Сборник трудов Международной конференции «Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия». – Комсомольск-на-Амуре, 2021.
5. Производство портландцемента [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfile.net/preview/5229949/page:7/#:~:text=В%20зависимости%20от%20приготовления%20сырьевой,и%20обжигают%20в%20сухом%20виде.> – Дата доступа : 11.10.2023.
6. Как делают сухой цемент: мокрый и сухой способ производства цемента, технология [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://1beton.info/proizvodstvo/napolniteli/kak-delayut-suhoj-tsement-mokryj-i-suhoj-sposob-proizvodstva-tsementa#i-2>. – Дата доступа : 19.03.2023.
7. Вращающиеся печи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stroytechnics.ru/article/vrashchayushchiesya-pechi>. – Дата доступа: 07.10.2023.
8. Влияние технологий производства цемента на выбросы углекислого газа / М. М. Рукавишников [и др.] // Труды одиннадцатой Всероссийской конференции с международным участием «Энергосбережение – теория и практика (Москва, 10–14 октября 2022 г.). – М. : ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2022. – С. 347–350.
9. Прайс-лист на продукцию ООО «Батайский Завод Строительных Материалов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bazasm.ru/price/?ysclid=Ih4n6xpfm0421774156>. – Дата доступа: 17.10.2023.
10. Беляева, З. В. Расчет и проектирование элементов металлических конструкций / З. В. Беляева, С. В. Кудрявцев. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. – 140 с.
11. Проектирование несущих конструкций многоэтажного каркасного здания / Н. Г. Головин [и др.]. – М. : МГСУ, 2014. – 72 с.
12. Поэлементная разборка зданий [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://infopedia.su/23x27f5.html>. – Дата доступа: 13.10.23.