

**Овчинников К. Н.**

к.т.н., доцент, руководитель магистерской программы «Геологическое обеспечение и мониторинг технологий утилизации, хранения и ресурсосбережения углеродных газов» Уфимского государственного нефтяного университета
kirill.ovchinnikov@energycc.org

КАРБОНОВЫЙ СЛЕД МИРОВОЙ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ, ТРЕНДЫ И ПОТЕНЦИАЛ ПО СНИЖЕНИЮ

В данной работе рассматривается роль цементной промышленности при глобальных выбросах CO₂. Производство цемента является важнейшим фактором, способствующим увеличению содержания CO₂ в атмосфере за счет двух факторов: сжигания топлива и декарбонизации известняка. Энергопотребление цементных заводов оценивается примерно в 2% от глобального потребления первичной энергии или почти 5% от общего мирового потребления энергии в промышленности. В статье описываются основные принципы производственного процесса производства, затем следует оценка исторического и регионального развития производства цемента, после – обзор выбросов от производства цемента. По итогу представляется краткий обзор возможностей сокращения выбросов как от использования горючего топлива, так и от процесса обжига при производстве цемента.

Ключевые слова: декарбонизация, карбонный след, снижение выбросов парниковых газов, геологическое захоронение CO₂, низкоуглеродная энергетика.

Угроза изменения климата считается одной из основных экологических проблем нашего общества. Двуокись углерода (CO₂) – один из основных парниковых газов. К обильному выделению CO₂ приводит сжигание природного горючего, вырубка лесов, неустойчивое сжигание биоматериалов и выбросы газов из минеральных источников. Производство цемента также способствует увеличению содержания CO₂ в атмосфере за счёт двух факторов: сжигания топлива и декарбонизации известняка. В настоящее время производится оценка содержания CO₂ исключительно от процесса декарбонизации известняка. Однозначная статистика по выбросам, связанным с использованием энергии в цементной промышленности, при этом отсутствует. В данном обзоре осуществляется анализ и последующая обобщённая оценка суммарных выбросов CO₂ в мировой цементной промышленности.

Цемент – один из важнейших строительных материалов во всём мире. Он используется в основном для производства бетона. Бетон, в свою очередь, представляет собой смесь инертных минеральных заполнителей, например, песка, гравия, щебня и цемента. Потребление и производство цемента тесно связано со строительной промышленностью и, следовательно, с общей экономической деятельностью. Из-за важности цемента, как строительного материала, и из-за географического обилия основного сырья цемент производят практически во всех странах. Его широкое производство также связано с относительно невысокой ценой и высокой плотностью производного материала, что, в свою очередь, ограничивает возможности наземного транспорта из-за высоких транспортных расходов.

Производство цемента является достаточно энергоёмким производственным процессом.

Энергопотребление цементных заводов оценивается примерно в 2% от глобального потребления первичной энергии или почти 5% от общего мирового потребления энергии в промышленности. Из-за преобладающего использования углеродных видов топлива, таких как уголь, при производстве клинкера цементная промышленность является основным источником выбросов CO₂. Помимо этого, CO₂ выделяется в процессе кальцинирования. Из-за сопровождающихся производственных процессов, а также выбросов от вырабатывания электроэнергии цементная промышленность является основным источником выделения двуокиси углерода, что, в свою очередь, заставляет пристально присмотреться к данной области и выработать стратегию, которая бы позволила сократить выбросы углерода.

Решение данной задачи требует углублённых исследований, поскольку смягчение последствий изменения климата может иметь серьёзные последствия. В данной работе рассматривается роль цементной промышленности при глобальных выбросах CO₂.

Для общего обзора и понимания в работе описываются основные принципы производственного процесса производства, затем следует оценка исторического и регионального развития производства цемента, после — обзор выбросов от производства цемента. По итогу представляется краткий обзор возможностей сокращения выбросов как от использования горючего топлива, так и от процесса обжига при производстве цемента.

Актуальность проблемы выбросов сектора цементной промышленности и описание принципов работы производства

Производство цемента — очень энергоёмкий процесс. Он состоит из нескольких основных этапов (*рис. 1*): подготовка сырья, изготовление клинкера в печи и производство цемента. Подготовка сырья и производство являются основными этапами, потребляющими много электроэнергии. Производство клинкера является наиболее энергоёмким производственным процессом, на который приходится около 70-80% всей потребляемой энергии. Подготовка сырья и чистовое измельчение — это энергоёмкие производственные операции. В описываемом ниже процессе предлагается сосредоточить внимание на использовании энергии, поскольку она способствует потенциальным выбросам CO₂.

Наиболее распространёнными источниками сырья для производства цемента является известняк, мел и глина, хотя в состав конечного продукта может входить более 30 различных веществ. Точный и постоянный состав сырья важен для достижения необходимого качества материала и

его однородности. Собранный сырьё отбирается и измельчается таким образом, чтобы полученная смесь имела необходимый химический состав, и была достигнута необходимая смесь для дальнейшей качественной термообработки. Щековая или вращательная дробилка, валковая или молотковая дробилка используются для дробления известняка на первоначальном этапе. Измельчённый материал просеивается, а камни удаляются. После дробления сырьё подвергается дальнейшей переработке. Процесс измельчения зависит от типа используемой термообработки с использованием шаровых или прокатных мельниц. Подача в печь называется сырьевой мукой. Для производства 1 т клинкера необходимо примерно 1.65-1.75 т сырьевой муки.

Клинкер же получают методом термообработки. Сырьевая мука обжигается при высоких температурах, сначала материалы прокаливаются, а затем клинкеруются для получения необходимого вещества. Для реализации проведения описываемого процесса используются различные типы печей.

В промышленно развитых странах измельчённое сырьё преимущественно перерабатывается во вращающихся печах. Вращающаяся печь представляет собой трубу диаметром примерно до 6 м. Трубка устанавливается под горизонтальным углом 3°-4° и вращается от одного до четырёх раз в минуту. Измельчённое сырьё движется по трубе к пламени. В цементной промышленности используются различные типы вращающихся печей. Если сырьё содержит более 20% воды, может быть предпочтительна мокрая обработка (исначально предпочтительным был мокрый процесс, так как было легче измельчить и контролировать состав и распределение частиц по размерам в суспензии; потребность в мокром процессе была уменьшена за счёт разработки улучшенных процессов гомогенизации). В мокром процессе суспензия обычно содержит 38% воды (диапазон от 24% до 48%). Затем сырьё перерабатывается в шаровой мельнице для образования суспензии (с дополнительной водой). Существуют различные варианты — например, полумокрый (влажность 17-22%) и полусухой (влажность 11-14%). Сохранение влаги в (высушенном) сырьё для сухой печи обычно составляет около 0,5% (0-0,7%). Сушильная печь может быть оборудована (многоступенчатыми) подогревателями. Введение подогревателя снижает энергозатраты на процесс горения. Подогревателем, который особенно подходит для сухого процесса, является подогреватель суспензии. Другой подогреватель — это колосниковый подогреватель, который в основном используется в полумокрых, полусухих, леполовых и более старых сухих печах. Пеллеты или брикеты помещаются на решётку, которая проходит через закрытый

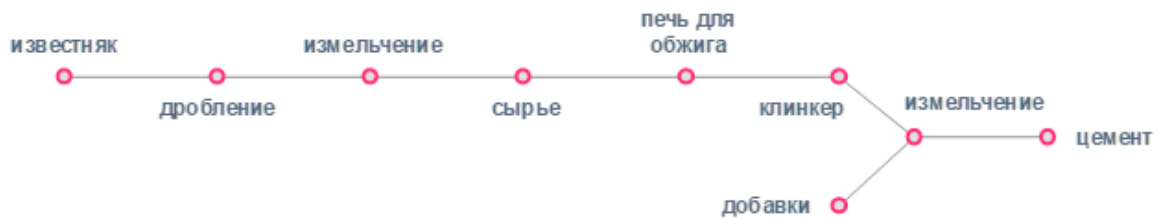


Рис. 1
Упрощенный схематичный процесс производства цемента

туннель. Кроме того, между печью и подогревателем суспензии может быть встроен прекальцинатор. Это камера с горелкой, в которой 80-95% CaCO_3 могут быть диссоциированы перед поступлением в печь. При обработке без предварительного обжига разложение (прокаливание) CaCO_3 до CaO и CO_2 происходит в печи. Применение прекальцинатора (а) снижает потребление энергии, (б) уменьшает длину печи, делая её менее дорогой, и (в) сокращает выбросы NO_x . Охлаждение клинкера может производиться в колосниковом, трубчатом (ротаторном) охладителе или планетарном охладителе. В колосниковом охладителе клинкер транспортируется на движущейся или возвратно-поступательной решётке, пропускаемой потоком воздуха. В трубчатом или планетарном охладителе клинкер охлаждается встречным потоком воздуха. Охлаждающий воздух служит потоком для горения. Таким образом, большая часть энергии клинкера возвращается в печь. Капитальные затраты на цементные заводы варьируются в зависимости от страны и местных условий. Капитальные затраты на строительство нового клинкерного завода с нуля в Северной Америке оцениваются в \$ 185 на 1 тонну мощности. Эксплуатационные расходы сильно различаются из-за различий в затратах на рабочую силу, износе и типе установки. Обзор цементных заводов США оценивает средние эксплуатационные расходы в \$ 36.4 на тонну цемента в 1990 году, включая затраты на электроэнергию, топливо и сырьё. Если в сырье и / или топливе печи присутствует избыток щёлочи, хлоридов или серы, они могут испаряться в печи и конденсироваться в подогревателе. Это может привести к проблемам в эксплуатации и изменению поведения при схватывании цемента. Спрос на слабощелочные цементы в США и Канаде выше, чем в Европе. В случае печей с подогревателем/прекальцинатором богатый щёлочью материал необходимо извлекать с помощью байпаса, который отводит часть потока выхлопных газов и удаляет из него твёрдые частицы для утилизации, увеличивая тепловые потери.

Шахтные печи используются в странах с отсутствием инфраструктуры для транспортировки сырья или для производства специальных типов цемента. На сегодняшний день большинство вер-

тикальных шахтных печей можно найти в Китае и в Индии, где отсутствие инфраструктуры, недостаток капитала и нехватка электроэнергии способствовали использованию небольших местных цементных заводов. В Китае это также является следствием модели промышленного развития, когда местные городские и сельские предприятия выступают в качестве двигателя индустриализации отдельных провинций, что приводит в итоге к использованию значительной доле именно шахтных печей в общем производстве цемента. Региональная политика индустриализации в Индии также способствовала использованию шахтных печей, помимо больших вращающихся печей. В Индии шахтные печи составляют растущую часть общего производства цемента и составляют почти 10% от производственной мощности с 1996 г. В Китае эта доля ещё выше: по оценкам, в 1995 г. было произведено 87% производства. Типичная производительность шахтных печей варьируется от 30 т (полностью ручную) до 180 т (механизированная) клинкера в сутки. Шахтные печи могут производить клинкер низкого качества, так как управлять всеми параметрами процесса сложнее.

Принцип работы всех шахтных печей аналогичен, хотя определённые характеристики могут отличаться. Гранулированный материал перемещается сверху вниз через те же зоны, что и во вращающейся печи. Высота печи определяется временем, необходимым для прохождения сырья через зоны, а также рабочими процедурами, составом гранул и продувкой воздухом сырья, поступающего в саму ёмкость. Шахтные печи могут достигать оптимальной эффективности за счёт грамотного теплообмена между подаваемыми и выхлопными газами. Наибольшие потери энергии в шахтных печах происходят из-за эффекта неполного сгорания, что, в свою очередь, приводит к выбросам CO и летучих органических соединений в окружающую среду.

Измельчение цементного клинкера вместе с добавками для регулирования свойств цемента (например, летучей золы, доменного шлака, пуццолана, гипса и ангидрита) можно производить в шаровых мельницах, валковых мельницах или при валковых прессах. Часто применяются комбинации этих методов фрезерования (**Таблица 1**). Крупный материал отделяется в классификаторе

и возвращается на дополнительное измельчение. Потребляемая мощность при измельчении сильно зависит от тонкости помола, необходимой для конечного продукта, и используемых добавок. Мелкость цемента влияет на его свойства и время схватывания.

В последнее время отрасль осознала необходимость идти дальше и поняла, что после подписания Парижского соглашения отрасль должна постараться насколько можно приблизить суммарные выбросы CO₂ в мире к нулю. Декарбонизация цементного сектора представляет собой одну из самых сложных проблем при переходе к низкоуглеродной экономике за счёт технологических выбросов, которых особенно трудно избежать. Для устранения технологических выбросов потребуются использование технологий улавливания CO₂.

На сегодняшний день разработка технологий улавливания, утилизации и хранения CO₂ не получила масштабных инвестиций, которые потребуются для обеспечения быстрого прогресса. Хотя улавливание CO₂ является проверенной технологией, её использование всё ещё дорого и вряд ли будет развиваться без нормативных стимулов. Кроме того, хранение CO₂ является дорогостоящим и географически ограниченным, в то время как технологии утилизации CO₂ находятся на ранней стадии разработки. Из-за потенциально более низких затрат на утилизацию по сравнению с хранением и возможности интеграции в существующие цепочки поставок использование CO₂ в производстве строительных материалов является привлекательной возможностью.

Есть ряд примеров технологий утилизации CO₂ в строительных материалах. Компания Solidia, разработала цемент с низким содержанием CaO и низким энергопотреблением, который позволяет снизить выбросы CO₂ как в процессе производства, так и в результате термического воздействия и быстро карбонизируется при воздействии CO₂. У компании CarbonCure, есть технология впрыскивания CO₂ в смеситель для улучшения характеристик готового бетона.

Тренды индустрии производства цемента по ключевым регионам-производителям

Мировое производство цемента выросло с 594 млн т в 1970 г. до 1453 млн т в 1995 г. со среднегодовыми темпами 3.6%. Потребление и производство цемента цикличны и совпадают с бизнес-циклами. Исторические производственные тенденции для 10 регионов мира представлены на *Рисунке 2*. *Рисунок 3* иллюстрирует производственные тенденции в 10 крупнейших странах-производителях цемента с 1970 по 1995 годы. Регионами с самыми высокими уровнями производства в 1995 году были Китай и Европа.

Как регион, Китай явно доминирует в текущем мировом производстве цемента, производя в среднем 477 млн тонн в год, что более чем в два раза больше, чем в следующем по величине регионе. В период с 1970 по 1995 год производство цемента в Китае резко выросло с 27 до 475 млн тонн при среднегодовом темпе роста 12.2%. Во многих отношениях цементная промышленность Китая уникальна большим количеством заводов, широким диапазоном форм собственности и разнообразием производственных технологий. В отличие от других отраслей тяжёлой промышленности, в производстве цемента не доминирует небольшое количество крупных «ключевых» предприятий. В 1995 г. крупные заводы мощностью более 100 тыс. т в год произвели лишь 28% из 476 млн т произведённого цемента. К концу 1994 года в Китае было более 7500 цементных заводов по всей стране. Эти, как правило, небольшие заводы работали со средней производительностью около 50 кт в год каждый, что примерно в десять раз меньше, чем у такого же среднестатистического завода в Соединённых Штатах.

Производство цемента в регионе Западной Европы оценивается в 180 млн т. Крупнейшими производителями цемента в этом регионе являются Италия, Германия, Испания и Франция.

Производство цемента в регионе Ближнего Востока показывало рост в среднем 10 % в год. Крупнейшими производителями цемента в этом регионе являются Турция, Египет, Иран и Саудовская Аравия.

Бразилия и Мексика доминируют в производстве цемента в регионе Латинской Америки; вместе они обеспечивают 54% производства в этом регионе.

В регионе Восточной Европы / бывшего Советского Союза производство цемента росло в среднем на 2.3% в год в период с 1970 по 1988 год. После распада Советского Союза и крупной реструктуризации, начавшейся в этом регионе в 1988 году, уровень производства снизился на 12.7% в год в среднем в период с 1990 по 1995 год. Производство цемента в бывшем Советском Союзе неуклонно росло с 95 млн т в 1970 году до

140 млн т в 1989 году. После распада СССР в конце 1980-х годов производство цемента в регионе резко упало, упав до 56 млн т в 1995 г.

В индийском регионе производство цемента в Индии выросло до 70 млн т обеспечив динамику роста 10% в год. В настоящее время цементная промышленность Индии является четвёртым по величине производителем цемента в мире.

Факторы, влияющие на выбросы CO₂

Выбросы углекислого газа при производстве цемента происходят непосредственно в результате сжигания топлива и процесса каль-

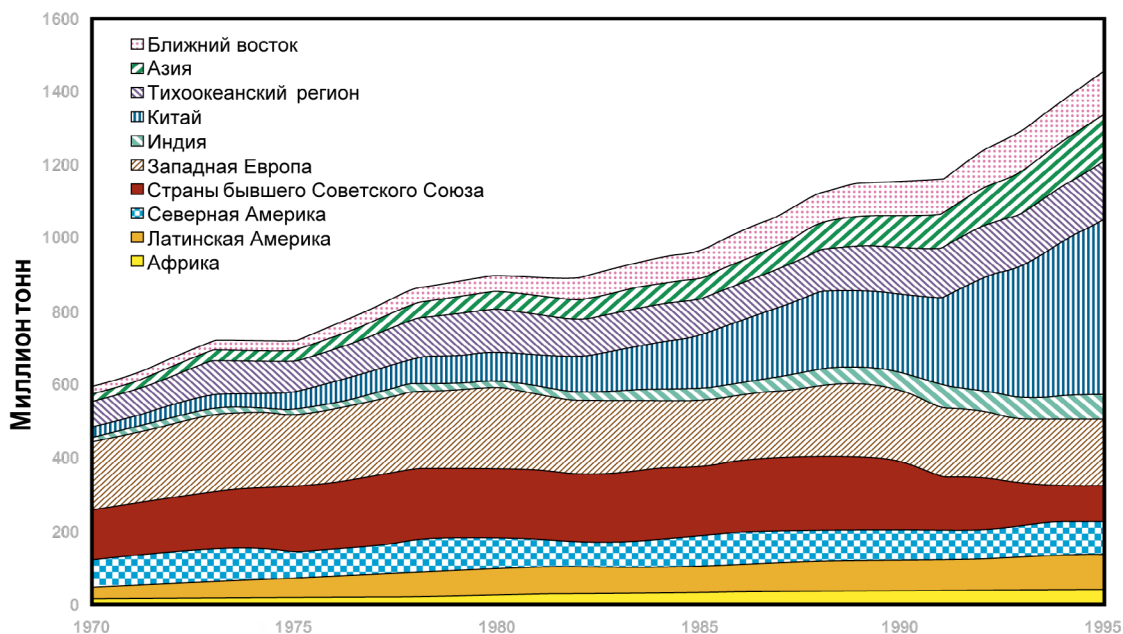


Рис. 2
Динамика изменения показателей цементной промышленности в различных странах

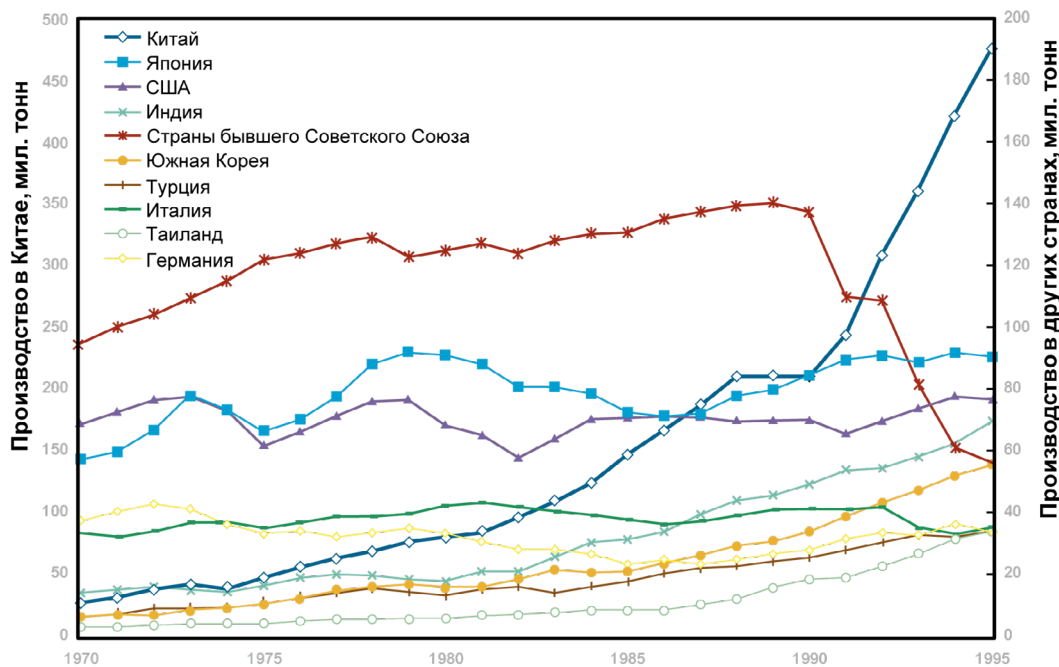


Рис. 3
Динамика изменения показателей цементной промышленности в различных странах

цинирования известняка в сырьевой смеси. Косвенным и значительно меньшим источником CO_2 является потребление электроэнергии, если предположить, что она вырабатывается из горючего природного топлива. Примерно половина выбросов CO_2 возникает в результате сгорания горючего, а половина – в результате переработки сырья. Не учитываются выбросы CO_2 , относящиеся к передвижному оборудованию, используемому для добычи сырья, используемому

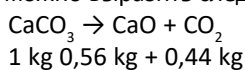
для транспортировки сырья и цемента, а также действующего на территории завода. Текущие оценки выбросов для цементной промышленности основаны исключительно на предполагаемом производстве клинкера и исключают выбросы, связанные с использованием энергии.

Общая оценка выбросов CO_2 представляется на основе тенденций производства и использования топливной энергии. Эта оценка основана на текущих общедоступных данных

по цементному сектору. Выбросы CO_2 рассчитывались в несколько этапов. 27 ведущих стран-производителей цемента, на которые пришлось 83% производства цемента, были определены по 10 региональным группам: Африка, Латинская Америка, Северная Америка, Восточная Европа и бывший Советский Союз, Европа, Индия, Китай, Тихоокеанский регион, страны Азии, Ближний Восток. Эти ключевые страны легли в основу нашей глобальной оценки.

Выбросы CO_2 при обжиге в процессе производства

Технологический CO_2 образуется при обжиге, что можно выразить следующим уравнением:



Доля CaO в клинкере составляет 64-67%. Остальная часть состоит из оксидов кремния, оксидов железа и оксидов алюминия. Таким образом, выбросы CO_2 при производстве клинкера составляют около 0,5 кг/кг. Выбросы CO_2 в процессе производства на тонну цемента зависят от соотношения клинкера и цемента. Это соотношение обычно варьируется от 0,5 до 0,95.

Оценим количество клинкера, производимого в ключевых странах, чтобы рассчитать технологические выбросы CO_2 , связанные с производством клинкера. Для технологических выбросов коэффициент обжига 0,136 Мт углерода (МтС)/т клинкера (0,5 Мт CO_2 /т клинкера) (1 Мт CO_2 = 0,27 МтС=0,27 ТгС) применялся к каждой метрической тонне произведённого клинкера. Фактические данные о производстве клинкера были собраны для Бразилии, Мексики, США, Канады, Германии, Индии, Китая, Японии и Кореи. Для тех неключевых стран, по которым не имелось конкретных данных о производстве клинкера, мы использовали расчётное среднее значение отношения клинкер/цемент (С/С). Страны делились на промышленно развитые и остальной мир, а также на две группы по соотношению С/С – 84% для промышленно развитых стран и 87% для остального мира – на основе средневзвешенных данных фактического отношения клинкера к цементу.

Выбросы CO_2 при использовании горючего топлива

Практически всё топливо используется при термообработке. Количество CO_2 , выделяемого во время этого процесса, зависит от типа используемого топлива (уголь, мазут, природный газ, нефтяной кокс, альтернативные виды топлива). Коэффициенты выбросов CO_2 топлива основаны на оценке, проведённой Межправительственной группой экспертов по изменению климата. Прямой расчёт коэффициента выброса отработанного топлива считается равным нулю, потому что ввод отходов заменяет эквивалентное коли-

чество энергии, полученной из ископаемого топлива, и CO_2 , вероятно, был бы выброшен (в краткосрочной или долгосрочной перспективе) в атмосферу без какой-либо пользы. Если отходы используются в конкуренции с альтернативными видами источников энергии, замену ископаемого топлива и предотвращение выбросов CO_2 следует рассмотреть более глубоко.

Чтобы рассчитать связанные с энергетикой выбросы CO_2 от потребления горючего топлива, сперва осуществлялся анализ данных за 1994 год о среднем удельном расходе топлива на тонну клинкера для ключевых стран или за год, ближайший к 1994 году, по которому имелись данные. Фактические данные об интенсивности для промышленно развитых стран были собраны для Канады, Германии, Франции, Италии, Японии, Кореи, Испании, Турции и США. Доступные данные о топливной интенсивности для развивающихся стран, а также для Восточной Европы и бывшего Советского Союза включают данные из Аргентины, Бразилии, Китая, Колумбии, Египта, Индии, Мексики, Польши и Венесуэлы. Для других ключевых стран (Марокко, Южная Африка, Украина, Таиланд, Тайвань, Индонезия, Саудовская Аравия и Иран) осуществлялся расчёт доли технологий мокрых и сухих печей для каждой страны. Затем применялся коэффициент интенсивности 5,9 ГДж/т клинкера для мокрых обжиговых печей и 3,5 ГДж/т клинкера для сухих печей для расчёта взвешенной топливной интенсивности для этих стран. Для стран, по которым данные об интенсивности использования топлива не были доступны, проводилась классификация: промышленно развитые страны и остальной мир. Для оценки применялась средневзвешенная топливноёмкость (на основе собранных фактических данных по ключевым странам) в размере 3,5 ГДж/т клинкера для промышленно развитых стран и 4,2 ГДж/т клинкера для стран остального мира.

Выбросы CO_2 при использовании электроэнергии

Последним шагом для оценки выбросов CO_2 был расчёт выбросов от потребления электроэнергии. Данные по удельному потреблению электроэнергии были проанализированы для тех же ключевых промышленно развитых и развивающихся стран, которые были собраны для данных о потреблении горючего топлива (Канада, Германия, Франция, Италия, Япония, Корея, Испания, Турция, США, Аргентина, Бразилия, Китай, Колумбия, Египет, Индия, Мексика, Польша и Венесуэла). Для всех других стран и региональных групп энергоёмкость всех печей была оценена в 0,3 ГДж/т цемента для промышленно развитых стран и 0,4 ГДж/т цемента для остального мира.

Статистические данные Международного энергетического агентства использовались для расчёта средней углеродоёмкости топливных ресурсов для производства электроэнергии в общественных местах для каждой страны и региональной группы.

Общий объём выбросов CO₂ при цементном производстве

Расчётные выбросы углерода от производства цемента в 1994 году составили 307 млн т С, 160 млн т от технологических выбросов углерода и 147 млн т от использования энергии. Эти выбросы составляют 5,0% мировых выбросов углерода в 1994 г. исходя из 6199 млн т, по данным Информационно-аналитического центра по двуокиси углерода.

В *Таблице 1* и на *Рисунке 4* представлены оценки выбросов CO₂ (в миллионах метрических тонн углерода) по ключевым странам и регионам-производителям цемента. Из представленных стран на Китай приходится самая большая доля общих выбросов (33,0%), за ним следуют США (6,2%), Индия (5,1%), Япония (5,1%) и Корея (3,7%). В целом на 10 ведущих производителей цемента в 1994 г. приходилось 63% мировых выбросов углерода от производства цемента. В региональном плане после Китая крупнейшими регионами-источниками выбросов являются Европа (11,5%), Тихоокеанский регион (9,3%), страны Азии, за исключением Китая и Индии (9,3%), и Ближний Восток (8,4%). Мировая средняя энергоёмкость первичной энергии составляла 4,8 ГДж/т, причём наиболее энергоёмкими регионами были Восточная Европа и страны бывшего Советского Союза (5,5 ГДж/т), Северная Америка (5,4 ГДж/т) и Ближний Восток (5,1 ГДж/т).

Средний мировой объём выбросов углерода при производстве цемента составляет 222 кг*С/т цемента. Хотя Китай является крупнейшим источником выбросов, наиболее углеродоёмким регионом производства цемента на тонну полученного сырья является Индия (253 кг*С/т), за которой следует Северная Америка (242 кг*С/т), а затем Китай (240 кг*С/т).

Снижение выбросов CO₂

Существует много возможностей для сокращения выбросов CO₂ в цементной промышленности.

Повышение энергоэффективности снижает выбросы CO₂ в результате использования топлива и электроэнергии и может снизить затраты на производство цемента. Оптимизация рассматриваемого процесса может быть достигнута за счёт использования более энергоэффективного оборудования и замены старых установок или перехода на совершенно новые типы процессов производства цемента. Безусловно, большая часть энергии, потребляемой при производстве цемента, состоит из горючего топлива, которое используется для обо-

грева печи. Следовательно, максимальный эффект при снижении энергозатрат может быть достигнут за счёт повышения эффективности использования топлива. В целом сухой способ более энергоэффективен, чем мокрый. Процессы в значительной степени взаимозаменяемы, но применимость может быть ограничена доступным сырьём (т.е. влажностью). Основные возможности печи – это переход на более энергоэффективные варианты процесса (например, с мокрого процесса на сухой с подогревателями и прекальцинатором), оптимизация охладителя клинкера, повышение эффективности предварительного нагрева, улучшенные горелки, а также процесс системы контроля и управления. Потребление электроэнергии можно снизить за счёт усовершенствованных систем измельчения, высокоэффективных классификаторов, высокоэффективных систем двигателей и систем управления технологическим процессом. Несколько исследований продемонстрировали наличие рентабельного потенциала повышения энергоэффективности в цементной промышленности. В Китае в рамках различных программ разработаны технологии повышения эффективности шахтных печей за счёт повышения механизации, изоляции, распределения слоёв и систем управления. Потенциал повышения энергоэффективности для всех шахтных печей составляет от 10% до 30%. Недавнее исследование цементной промышленности Индии обнаружило технический потенциал повышения энергоэффективности почти на 33% при использовании коммерчески доступных технологий. Предполагается, что технологии будущего позволят сэкономить почти 48% энергии. Это приведёт к сокращению выбросов CO₂ на 27%. Однако экономический потенциал повышения энергоэффективности оценивается в 24% от общего объёма потребления первичной энергии. Сосредоточившись на коммерчески доступных технологиях, можно выделить 29 энергоэффективных технологий, которые ещё могут быть в некоторой степени приняты цементной промышленностью для решения сокращения выбросов CO₂. Однако экономический потенциал оценивается всего в 11% из-за высоких капитальных затрат и низких затрат на энергию. Это ограничивает потенциал сокращения выбросов CO₂ до 5%. Если цементная промышленность расширит использование смешанного цемента, то экономический потенциал может возрасти до 18%, что может способствовать снижению общих выбросов CO₂ на 16%.

Одним из вариантов снижения выбросов CO₂ является снижение содержания углерода в топливе, например, переход с угля на природный газ. Важной возможностью сократить выбросы углерода в результате длительного промышленного цикла является использование альтернативных

Таблица.1.
Потребление энергии в процессах производства

Страна	Производство цемента, млн т	Соотношение вода-цемент, %	Первичное напряжение, ГДж/т	Первичное энергия, ПДж	Процесс выброса CO ₂ , млн т	Выброс CO ₂ /энергия, млн т	Общий объем выбросов CO ₂ , млн т	Доля выбросов по всему миру, %
Китай	423	0.83	5.0	2117	47.7	53.7	101.4	33.0%
Европа	181.9		4.1	749	20.0	15.3	35.3	11.5%
Италия	33.2	0.8	4.5	150	3.6	3.2	6.8	2.2%
Франция	21.2	0.74	4.1	88	2.1	1.5	3.6	1.2%
Германия	36.1	0.79	3.8	137	3.9	2.8	6.7	2.2%
Испания	26.7	0.81	3.9	104	2.9	2.5	5.5	1.8%
Остальная Европа	64.7	0.84	4.2	271	7.4	5.2	12.5	4.1%
Тихоокеанский регион	151.3		3.5	533	17.6	11.0	28.6	9.3%
Япония	91.6	0.8	3.1	280	9.9	5.7	15.6	5.1%
Корея	51.6	0.96	4.3	220	6.7	4.6	11.4	3.7%
Остальная часть региона	8.0	0.84	4.2	34	0.9	0.7	1.6	0.5%
Страны Азии	123.8		4.9	613	15.3	13.3	28.6	9.3%
Таиланд	31.1	0.9	4.8	148	3.8	3.4	7.2	2.4%
Тайвань	23.2	0.95	4.9	114	3.0	2.5	5.5	1.8%
Индонезия	21.9	0.96	5.3	115	2.9	2.4	5.3	1.7%
Остальная часть Азии	47.6	0.87	4.9	235	5.6	4.9	10.5	3.4%
Ближний Восток	111.2		5.1	563	13.8	12.0	25.8	8.4%
Саудовская Аравия	16.0	0.87	4.7	75	1.9	1.4	3.3	1.1%
Египет	16.1	0.99	5.8	93	2.2	1.9	4.1	1.3%
Иран	15.9	0.97	5.3	84	2.1	1.6	3.7	1.2%
Турция	31.9	0.9	4.9	156	3.9	4.1	8	2.6%
Остальная часть Ближнего Востока	31.4	0.87	4.9	155	3.7	3.0	6.7	2.2%

Таблица.1.
Потребление энергии в процессах производства

Страна	Производство цемента, млн т	Соотношение вода-цемент, %	Первичное напряжение, ГДж/т	Первичное энергия, ПДж	Процесс выброса CO ₂ , млн т	Выброс CO ₂ /энергия, млн т	Общий объем выбросов CO ₂ , млн т	Доля выбросов по всему миру, %
Северная Америка		88.4	5.4	480	10.6	10.8	21.4	7.00%
США	77.9	88%	5.5	427	9.3	9.6	18.9	6.20%
Канада	10.5	88%	5.1	53	1.3	1.2	2.5	0.80%
Страны ex-СССР		100.7	5.5	558	11.4	10.3	21.7	7.10%
Польша	14.9	82%	5.6	83	1.7	2.1	3.8	1.20%
Украина	11.4	80%	6	68	1.3	1.3	2.6	0.80%
Россия	37.2	80%	6	223	4.1	3.8	7.8	2.50%
Оставшиеся ex-страны СССР	37.1	87%	4.9	183	4.4	3.2	7.6	2.50%
Латинская Америка		97.4	4.7	462	11.2	8.2	19.4	6.30%
Бразилия	25.2	77%	4.1	102	2.6	1.7	4.4	1.40%
Мексика	29.8	88%	4.5	133	3.6	2.5	6	2.00%
Колумбия	8.3	82%	6.1	51	0.9	1	2	0.60%
Венесуэла	7.5	87%	5.7	43	0.9	0.6	1.5	0.50%
Аргентина	6.3	90%	5.3	33	0.8	0.5	1.3	0.40%
Остальная часть Латинской Америки	20.2	87%	4.9	100	2.4	1.9	4.2	1.40%
Индия	62.4	89%	5	309	7.6	8.2	15.8	5.10%
Африка		41	4.9	201	4.9	4.2	9	2.90%
Марокко	6.3	85%	4.8	30	0.7	0.8	1.5	0.50%
Южная Африка	7.9	90%	4.9	39	1	1	1.9	0.60%
Остальная часть Африки	26.8	87%	4.9	132	3.2	2.4	5.6	1.80%
По всему миру	1380.9	85%	4.8	6585	160	147	307	100%

видов топлива, получаемых из отходов. Это могло бы в то же время уменьшить удаление отходов и сократить использование горючего топлива. При использовании топлива, полученного из отходов, следует учитывать ряд вопросов:

- энергоэффективность сжигания отходов в цементных печах;
- постоянное качество цементного продукта и топлива;
- выбросы в атмосферу;

- микроэлементы и тяжёлые металлы;
- альтернативная судьба отходов;
- производство вторичных отходов.

Однако, при замене типа горючего могут возникать определённые сложности: это может негативным образом сказываться на качестве цемента и повышать выброс других вредных газов. Следует отметить, что выбросы, как правило, больше зависят от условий эксплуатации печи, чем от типа топлива. Альтернативные ви-

ды топлива могут быть газообразными, жидкими (например, отработанные растворители, не содержащие галогенов, остатки дистилляции, отработанные масла) или твёрдыми (например, древесные отходы, осушенный осадок сточных вод и пр.). Чистое сокращение выбросов зависит от природы и характеристик отходов, а также от процесса их переработки. Переработка отходов цементной промышленности возможна и является действующей практикой.

Отходы в качестве альтернативного топлива всё чаще используются на цементных заводах. В 1990 году европейская цементная промышленность использовала от 0.75 до 1 млн тонн альтернативных видов топлива в год, что эквивалентно 25-35 ПДж. В 1993 г. 9% потребления тепловой энергии в цементной промышленности Европы приходилось на альтернативные виды топлива. Отходы могут снизить выбросы CO_2 на 0.1-0.5 кг/кг производимого цемента по сравнению с существующими технологиями производства с использованием горючего топлива. Использование отходов не приводит к дополнительным выбросам, хотя следует обращать внимание на легколетучие элементы, такие как ртуть и таллий.

Производство клинкера является наиболее энергоёмким этапом в цементной промышленности и также вызывает большие выбросы CO_2 . В смешанном цементе часть клинкера заменяется промышленными побочными продуктами, такими как уголь, летучая зола (остаток от сжигания угля), доменный шлак (остаток от производства чугуна) или другие пуццолановые материалы (например, вулканический материал). Эти продукты смешиваются с измельчённым клинкером для получения однородного продукта – смешанного цемента. Смешанный цемент имеет свойства, отличные от портландцемента, например, схватывание занимает больше времени, но предел прочности при этом выше.

Текущее применение добавок при производстве цемента широко варьируется в зависимости от страны и региона. Хотя использование смешанных цементов часто встречается в Европе, в других местах, например, таких, как Северная Америка, оно менее распространено. Относительная важность использования добавок может быть выражена соотношением C/C при производстве цемента в конкретной стране. Портландцемент имеет отношение C/C в 0,95, тогда как у доменного шлакового цемента отношение C/C может составлять всего 0,35. Такие страны, как США, Канада и Соединённое Королевство, имеют высокие отношения C/C, что свидетельствует о преобладании портландцемента, тогда как такие страны, как Бельгия, Франция и страны бывшего Советского Со-

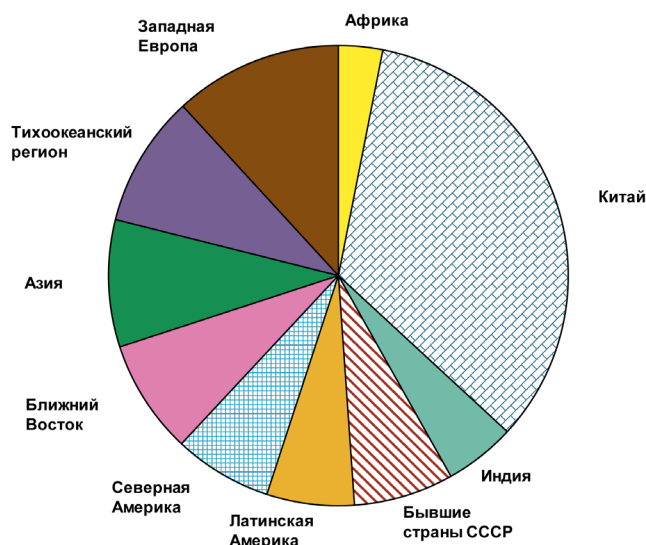


Рис. 4 Доля выбросов CO_2 от производства цемента в мире

юза, демонстрируют более низкие отношения C/C, что свидетельствует о более высоких показателях использования смешанных цементов. Поскольку данные о производстве клинкера не собираются из международных источников, невозможно точно оценить текущую практику во всех странах-производителях цемента. Основными препятствиями на пути дальнейшего применения цементных смесей, по-видимому, являются не проблемы с поставками или окружающей средой, а скорее, существующие стандарты и спецификации на продукцию, а также строительные нормы и правила.

Будущий потенциал применения смешанных цементов зависит от текущего уровня применения, от наличия смесевых материалов, а также от стандартов и требований законодательства. Глобальный потенциал сокращения выбросов CO_2 за счёт производства смешанного цемента оценивается как минимум в 5% от общих выбросов CO_2 от производства цемента (56 Мт CO_2), но может достигать 20%. Возможная экономия зависит от страны и региона. Worrell и другие оценили потенциал сокращения выбросов углерода на национальном уровне для 24 стран ОЭСР, Восточной Европы и Латинской Америки. Они оценили минимальную доступность смесевых материалов на основе производства передельного чугуна и сжигания угля. Потенциальное сокращение выбросов колеблется от 0% до 29%. Среднее сокращение выбросов для всех стран (производящих 35% мирового цемента в базисном 1990 году) оценивается в 22%. Он был незначительным для стран с большой долей производства смешанного цемента (например, Нидерланды) или с низкой доступностью смесевых материалов, то есть в странах без произ-

водства чугуна или угольных электростанций. Он был высоким для стран с ограниченным производством цементных смесей и хорошо развитой промышленностью или энергетикой на ископаемом топливе (например, Соединённое Королевство, США). Коэффициент C/C для Китая оценивается в 85%. Принимая во внимание крупное производство чугуна и использование угля в производстве электроэнергии в Китае, у крупнейшего в мире производителя цемента также можно ожидать большого потенциала для производства цемента с добавками.

Заключение

Цементная промышленность вносит большой вклад в глобальные выбросы CO₂, который выделяется в процессе обжига известняка, при сжигании топлива в печи и при выработке электроэнергии. Расчётные выбросы углерода от производства цемента в 1994 году составили 307 млн т, 160 млн т от кальцинирования и 147 млн т от использования энергии. Эти выбросы составляют 5% глобальных антропогенных выбросов CO₂.

На Китай приходится самая большая доля общих выбросов (33%), за ним следуют США (6%), Индия (5%), Япония (5%) и Корея (4%). В целом на 10 ведущих производителей цемента приходится около 63% мировых выбросов углерода от производства цемента. В региональном плане

после Китая крупнейшими регионами-источниками выбросов являются Европа (12%), Тихоокеанский регион (9%), страны Азии, за исключением Китая и Индии (9%), и Ближний Восток (8%).

Средний мировой объем выбросов углерода при производстве цемента составляет 222 кг C/т цемента. Хотя Китай является крупнейшим источником выбросов, наиболее крупным цементным регионом с точки зрения выбросов углерода на тонну произведённого цемента является Индия (253 кг C/т), за которой следуют Северная Америка (242 кг C/т) и Китай (240 кг C/т).

Выбросы CO₂ можно снизить за счёт оптимизации производства, перехода к более энергоэффективному процессу (например, от мокрого к сухому), замены высокоуглеродистого горючего топлива низкоуглеродистым или же альтернативными видами топлива, а также более низкого отношения C/C за счёт производства смешанных цементов. Производство смешанных цементов кажется многообещающим вариантом сокращения выбросов CO₂, связанных как с топливом, так и с технологическими процессами в краткосрочной перспективе. В краткосрочной перспективе повышение энергоэффективности, строительство новых печей, увеличение производства смешанных цементов и более широкое использование отработанного топлива являются наиболее экономически эффективными мерами. XXI

Литература

1. Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26(1), 303-329.
2. Initiative, C. S. (2005). CO₂ Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. Geneva: WorldBusinessCouncilforSustainableDevelopment.
3. Lei, Y., Zhang, Q., Nielsen, C., & He, K. (2011). An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020. *Atmospheric Environment*, 45(1), 147-154.
4. Vashishth, A., & Jayant, B. (2021). Deterministic Approach for Calculation of Carbon Footprint for Cement Plants in India.
5. Katashov A., Ovchinnikov K., Maliavko E., Tatarinov D., Ogienko V. (2021). Digital platform as a tool for efficient reservoir management. *First Break*. T. 39, № 7. С. 57-61
6. Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., Chen, F., & Gao, L. (2017). Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *renewable and sustainable energy reviews*, 74, 522-537.
7. Summerbell, D. L., Barlow, C. Y., & Cullen, J. M. (2016). Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1327-1339.
8. Овчинников К. (2022) Перспективные технологии для улавливания, мониторинга и предотвращения утечек CO₂ из геологических хранилищ. Нефтегазовая вертикаль, N7-8
9. Овчинников К. (2022). Экономика проектов геологического захоронения CO₂ с целью повышения нефтеотдачи, Нефтегазовая вертикаль, №6

UDC 620.9, 550.9

K.N. Ovchinnikov, PhD, Associate Professor, Head of CCUS discipline Ufa State University, kirill.ovchinnikov@energycc.org

CARBON FOOTPRINT OF CEMENT INDUSTRY. INFLUENCE FACTORS, TRENDS AND POINTS OF IMPROVEMENT

Abstract: This paper examines the role of the cement industry in global CO₂ emissions. Cement production is a major contributor to the increase in CO₂ in the atmosphere through two factors: fuel combustion and limestone decarbonization. The energy consumption of cement plants is estimated at about 2% of global primary energy consumption, or nearly 5% of total global industrial energy consumption. The paper describes the basic principles of the production process, followed by an assessment of the historical and regional development of cement production. In summary paper provides a brief overview of the opportunities to reduce CO₂ emissions.

Keywords: CCUS, decarbonization, carbon footprint, CO₂ emissions reduction, CO₂ storage, low carbon energy