

Перспективы развития и декарбонизации цементной промышленности мира

И.А. Башмаков

Центр энергоэффективности – XXI век,
Россия, 117418, г. Москва, ул. Новочеремушкинская, д. 61

Адрес для переписки: *bashmako@co.ru*

Реферат. В статье рассмотрены тенденции и прогнозные оценки развития мировой цементной промышленности и основные направления ее декарбонизации. В 2019-2020 гг. на производство цемента в мире пришлось более 3 ГтСО₂экв., или 17% всех выбросов парниковых газов (ПГ) от промышленности и 5% всех глобальных антропогенных выбросов ПГ. Показано, что глубокая декарбонизация цементной промышленности возможна в основном за счет снижения материалоемкости, замещения клинкера другими материалами, а также за счет масштабного применения технологии CCUS. Для решения задачи декарбонизации при минимальных затратах нужно использовать широкий пакет технологий. Однако, только небольшая часть задачи глубокой декарбонизации цементной промышленности решается на счет уже широко используемых на рынке технологий. Прогресс в коммерциализации и удешевлении инновационных технологий будет определять реальные временные границы декарбонизации мировой цементной промышленности.

Ключевые слова. Мировая цементная промышленность, декарбонизация, прогнозы, парниковые газы, технологии.

Global cement industry development and decarbonization perspectives

I.A. Bashmakov

Center for Energy Efficiency – XXI,
61, Novocheremushkinskaya str., 117418, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *bashmako@co.ru*

Abstract. The article discusses trends and projections for the global cement industry and the key decarbonization pathways. In 2019-2020, global cement industry was responsible for more than 3 Gt CO₂eq., or 17% of total industrial greenhouse gas (GHG) emissions and 5% of total anthropogenic GHG emission. The paper shows, that deep decarbonization of the cement industry is attainable mostly through material intensity reduction, replacement of clinker with other materials, and large-scale CCUS uptake. Least-cost decarbonization solutions require a large variety of technologies. However, only a small part of this deep

decarbonization challenge can be addressed through the technologies which are currently widely used. Eventual commercialization and cost reduction of innovative technologies will determine the real decarbonization schedule for the global cement industry.

Keywords. Global cement industry, decarbonization, projections, greenhouse gases, technologies.

Основные тенденции развития мировой цементной промышленности

Удельное потребление цемента можно отслеживать и сравнивать на основе двух индикаторов – текущее потребление цемента на душу населения и запас цемента на душу населения. Запас цемента – это объем цемента, воплощенного в накопленном физическом капитале – в действующих инфраструктуре, зданиях и сооружениях. Он кратен выше текущего потребления цемента. По запасу цемента некоторые развитые страны уже выходят на уровень насыщения в диапазоне 12-30 т/чел. (рис. 1). Ретроспективная динамика текущего потребления цемента на душу населения в разных странах показывает наличие его сложной зависимости от ВВП на душу населения: рост до уровня 0.4-0.8 т/чел./год в зоне до 25 тыс. долл. 2017 г. (по паритету покупательной способности ППС) сменяется стабилизацией при доходе 25-40 тыс. долл. с последующим снижением до уровня ниже 0.4 т/чел при более высоких уровнях дохода (рис. 1). Как динамика, так и уровень насыщения зависят от скорости и уровня экономического развития, темпов урбанизации и объемов строительства инфраструктуры.

Соотношение между динамикой накопленного запаса цемента и его годовым потреблением не является тривиальным. Оно зависит от стадий экономического развития и может иметь точки перелома. Cao et al. (2017) выделили 5 стадий. Переход от одной стадии к другой зависит от достигнутого уровня экономического развития. Согласно классификации Cao et al. (2017), на ранней стадии развития запас цемента в накопленном капитале растет линейно и медленно, на следующих стадиях рост ускоряется, затем замедляется, а на стадии высокого уровня развития – прекращается. Ряд стран уже находится на этой стадии насыщения. Насыщение уровня потребления на душу населения происходит раньше, чем насыщение запаса на душу населения (Bleischwitz et al., 2018). Когда запас цемента в накопленном капитале выходит на уровни насыщения, которые по странам отличаются, выбытие объемов цемента из запаса по мере сноса старых объектов становится равным его приросту за счет нового строительства. В итоге потребность в цементе на душу населения сначала стабилизируется, а затем начинает сокращаться. По имеющимся оценкам, запас бетона во всех действующих зданиях и сооружениях мира превышает 400 Гт (более 50 т/чел.) (Krausmann et al., 2018; Wiedenhofer et al., 2019), включая составляющую цемента в нем – 80-100 Гт (более 10 т/чел.) (Cao et al., 2017). При высоком доходе на душу населения, его численность либо растет медленно, либо стабилизируется, или даже сни-

жается, поэтому абсолютное текущее потребление цемента либо стабилизируется, либо начинает падать.

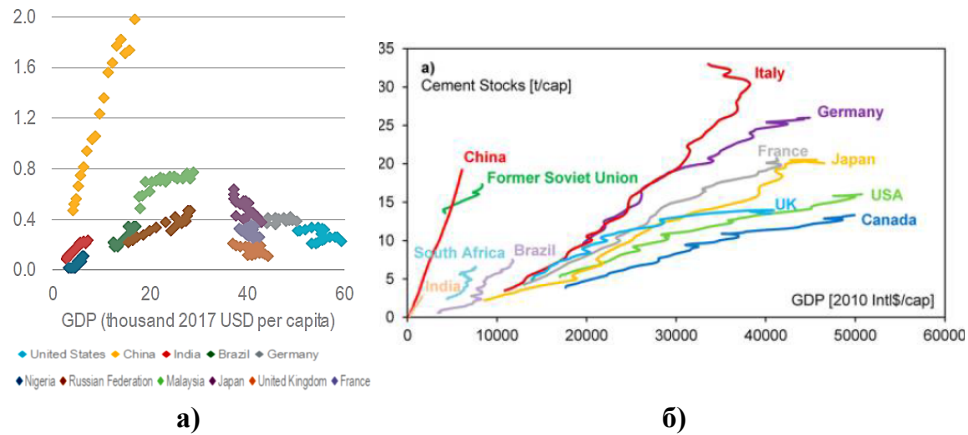


Рисунок 1. Зависимость накопленного запаса цемента и его текущего потребления на душу населения от уровня экономического развития (Cao et al.; 2017; IEA, 2019b): а) зависимость потребления цемента на душу населения от дохода на душу населения; б) зависимость накопленного запаса цемента на душу населения от дохода на душу населения

Figure 1. Annual per capita cement use and accumulated per capita cement stock (and as a function of GDP per capita (Cao et al., 2017; IEA, 2019b): a) annual per capita cements use as a function of GDP per capita; b) accumulated cement stock per capita cements use as a function of GDP

В ближайшие десятилетия можно ожидать постепенного выхода на абсолютные максимумы глобального потребления цемента. Анализ в рамках логики модели «услуги-запас-поток-окружающая среда» (Башмаков, 2021; Cao et al., 2017; Bleischwitz et al., 2018) позволяет понять, почему параметры динамики и структуру роста потребления многих материалов в прошлом нельзя автоматически переносить на будущее. Запас цемента в накопленном капитале можно оценить равным 100 Гт¹⁾, а среднее значение на душу населения в мире в 2021 г. можно оценить равным 12-13 т/чел. при среднем доходе в 2019 г. по миру в целом 17 тыс. долл./чел. (ППС в ценах 2017 г.). Мир постепенно приближается к порогу стабилизации удельного потребления цемента. Если рост ВВП на душу населения составит в среднем 2.5% в год, то к 2030 г. ВВП превысит 20 тыс. долл./чел по ППС в ценах 2017 г., после чего рост потребления цемента на душу населения заметно замедляется, а само потребление цемента растет в основном по мере роста численности населения.

Такая перспективная динамика резко контрастирует с ретроспективой. В 1990-2019 гг. глобальное потребление цемента выросло в 3.5 раза, а в 1970-2020 – почти в 7 раз (рис. 2). В основном цемент используется для изготовления бетона (73%), строительных растворов и штукатурки. Бетон конкурирует с такими материалами, как сталь, древесина, камень, алюминий, асфальт, кирпич и стекло, поэтому важно сопоставлять динамику производства цемента с

¹⁾ На 2014 г. он был оценен равным 75 Гт (Cao et al., 2020).

другими базовыми материалами (Bashmakov et al., 2022). После 1990 г. оно росло примерно так же быстро, как и потребление многих прочих материалов, и долго опережало рост как ВВП, так и населения. В 2000-2014 гг. (годы экономического бума в Китае) произошел взрывной рост производства цемента (рис. 2), объем которого достиг 4180 млн т. Затем, вплоть до 2020 г., он стабилизировался на уровне около 4.1-4.2 млрд т (USGS, 2021). По данным GCCA и МЭА, в 2019 г. было произведено 4.2 млрд т цемента (45% использовано на строительство жилых зданий, 48% – на строительство объектов инфраструктуры, еще 8% – на промышленное оборудование) и 14 млрд м³ бетона на сумму 440 млрд долл. (GCCA, 2021b).

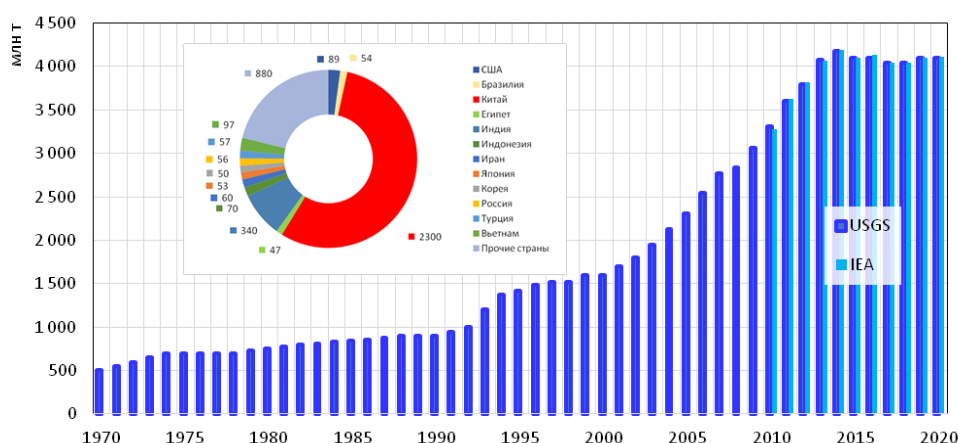


Рисунок 2. Динамика производства цемента в мире в 1970-2020 гг. и вклад основных производителей в 2020 г. (Worrell et al., 2001; USGS, 2021)

Figure 2. Global cement production in 1970-2020 and production split by major producers for 2020 (Worrell et al., 2001; USGS, 2021)

В 2020 г. на долю Китая пришлось 56% всего мирового производства цемента, а на долю России – только 1.4%. Согласно данным USGS, мировые мощности по производству клинкера составили в 2020 г. 3.7 млрд т, из которых 53% пришлось на Китай. Производство клинкера меньше, чем цемента, поскольку в состав последнего помимо клинкера входят такие материалы, как летучая зола, гранулированный доменный шлак и другие заменители. Распределение цементных заводов по срокам службы (Chen et al., 2022) показывает, что самые новые и технологически совершенные заводы построены в последние годы в основном в быстро растущих развивающихся странах, в первую очередь, в Китае и Индии. В развитых странах в основном работают довольно старые цементные заводы.

Ниже описаны основные тенденции, которые сложились в мировой цементной промышленности в 1990-2020 гг.

Материалоемкость. После того как китайский строительный бум закончился (с 2014 г.), мировое потребление цемента перестало расти, а тенденция роста «цементоемкости» глобального ВВП сменилась тенденцией ее снижения.

Циклическая экономика. В отличие от металлов, цемент практически невозможно использовать повторно при приготовлении цемента, но строительные отходы от сноса зданий и сооружений (примерно 5-7 млрд т бетона в год, содержание цемента не менее 0.5 млрд т, Cao et al., 2020) можно использовать вместо других наполнителей бетонов или для замены строительных материалов, например, гравия. Основная часть строительного мусора захоранивается.

Состав цемента. Доля добавок динамично росла в 2000-2010 гг., увеличившись с 16 до 23%, а затем почти стабилизировалась на уровне 23-24% в 2011-2019 гг. В 2019 г. в Индии эта доля достигла 32% (в т.ч. 20% – летучая зола), в Латинской Америке – 29% (Бразилия – 31%), в ЕС – 23% (Австрия – 30%, Германия – 28%, Польша – 26%), а в США – только 11%. Отношение клинкер/цемент является производной от состава цемента. По данным ГССА, для мира в целом доля клинкера в цементе снизилась с 83% в 1990 г. до 75% в 2019 г. После 2010 г. это снижение резко замедлилось. В Индии в 2019 г. эта доля составила 67%. Минимальное значение этого параметра равно 50%.

Удельные расходы энергии. По сравнению с 2000 г. параметры энергоэффективности при производстве клинкера и цемента выросли. Тем не менее, их средние по миру значения еще заметно уступают параметрам наилучших из имеющихся технологий, а максимальные удельные расходы заметно превышают средние. Наилучшие имеющиеся в мире значения удельных расходов энергии для производства клинкера составляют 96 кгУТ/т,²⁾ а для производства цемента – 56 кВт-ч/т. Их снижение замедляется по мере приближения к термодинамическому минимуму – 58-62 кгУТ/т (Moуa et al., 2010)³⁾.

Удельные расходы топлива на производство клинкера зависят от способа его производства (табл. 1). По мере роста доли сухого способа производства клинкера (табл. 1) средние удельные расходы топлива постепенно сокращались. Однако с 2010 г.⁴⁾ перестройка технологической структуры и снижение общемирового показателя удельного расхода заметно замедлились. Самые низкие удельные расходы были в Индии, где построены одни из самых современных цементных заводов.

Удельные расходы электроэнергии на производство цемента также сокращались. В среднем по выборке предприятий, по которым проводит анализ ГССА, они снизились с 119 до 102 кВт-ч/т в 1990-2010 гг. В ЕС-28 этот показатель несколько вырос, а в Индии динамично снижался до 73 кВт-ч/т, что существенно ниже значений в других регионах мира. В Китае он также ниже 80 кВт-ч/т (BEE, 2018).

Состав используемого топлива. Еще одной устойчивой тенденцией является снижение доли ископаемого топлива в топливном балансе печей по

²⁾ Такой показатель уже достигнут на лучших предприятиях Индии, и именно такой целевой ориентир ставит Индия на 2030 г. (BEE, 2018).

³⁾ по другим оценкам, 38 кгУТ/т (DOE, 2017).

⁴⁾ В США еще раньше – с 1985 г. См. (Worrell et al., 2013).

производству клинкера. Она упала с 98% в 1990 г. до 81% в 2019 г., а для отдельных предприятий она лишь немногим превышает 20%. В 2019 г. в ЕС на долю альтернативных топлив пришлось 32%, биомассы – 18%, а ископаемых топлив – только 50%. В Германии на долю альтернативных топлив в 1990 г. пришлось 6%, биомассы – 1%, а ископаемых топлив – 93%; в 2000 г. – соответственно 21%, 3% и 76%, а в 2019 г. – 48%, 22% и 30%. Эти цифры показывают, что топливный баланс печей по производству клинкера может быть существенно изменен в довольно сжатые сроки. Также высока доля применения альтернативных топлив при производстве цемента в Австрии (58%); Греции (48%); Великобритании (27%); Франции (23.2%) и Польше (22%). С увеличением доли использования альтернативных топлив могут несколько вырастать удельные расходы энергии, поскольку для этих видов топлива характерна меньшая теплотворная способность, повышенная влажность и др. (GCCA, 2021a).

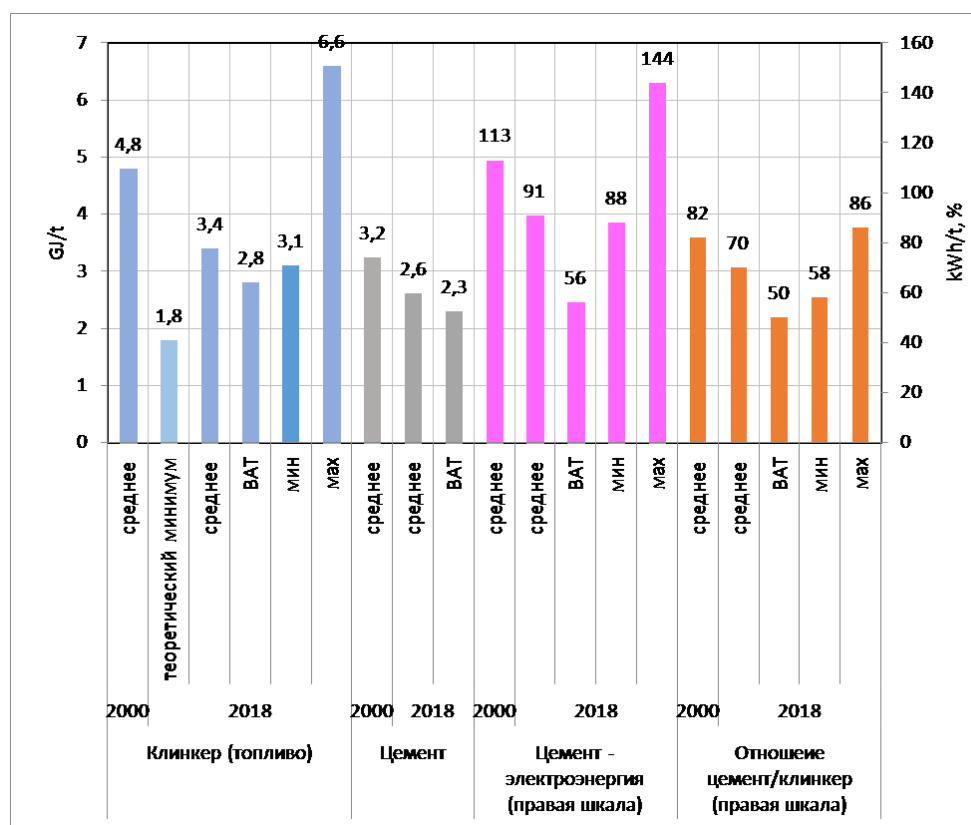


Рисунок 3. Параметры энергоэффективности при производстве клинкера и цемента (IEA, 2020a; IEA, 2019; GCCA, 2021a; BEE, 2018)

БАТ – самое низкое значение удельных расходов; мин – значение для предприятий, замыкающих 10% предприятий с самыми низкими удельными расходами; мах – самые высокие расходы

Figure 3. Energy efficiency indicators for clinker and cement production (IEA, 2020a; IEA, 2019; GCCA, 2021a; BEE, 2018)

BAT – best available technology level; min – value for producers that close the 10% of enterprises with the lowest specific energy use; max – maximum value

Таблица 1. Удельные расходы топлива на производство клинкера по способам производства, кг у.т./т (GCCA, 2021a)

Table 1. Specific energy use for clinker production by technologies, kgce/t, (GCCA, 2021a)

| Способ производства | 1990 | 2000 | 2010 | 2019 |
|---|------|------|------|------|
| Сухой с подогревом и предварительным кальцинером | 116 | 115 | 114 | 115 |
| Сухой с подогревом без предварительного кальцинера | 126 | 122 | 123 | 120 |
| Сухой без предварительного нагрева (длинная сухая печь) | 153 | 146 | 137 | 133 |
| Полувлажный/полусухой | 129 | 130 | 131 | 142 |
| Мокрый / шахтная печь | 205 | 208 | 204 | 183 |

Примечание: Источник GCCA, 2021.

Перспективы развития цементной промышленности в мире до 2050-2100 гг.

Несколько решающих факторов будут определять глобальный спрос на цемент: рост численности населения, изменение накопленного запаса цемента на душу населения с выходом на насыщение для многих стран, а позднее и для мира в целом, рост уровня урбанизации в развивающихся экономиках, снижение удельного расхода бетона и цемента при возведении объектов за счет повышения эффективности их использования и совершенствования их свойств.

Низкие сценарии к 2100 г. выходят на уровень мирового производства цемента в диапазоне 4000-4500 млн т, средние – 5500-6000 млн т, высокие – 7000-7500 млн т (Сао et al., 2020). Эти диапазоны близки к оценкам на конец XXI века по выбытию цемента из накопленного запаса за счет сноса отслуживших сроки объектов в диапазонах 4000-4200 млн т для низких сценариев, 4700-5500 млн т для средних и 5500-6700 млн т для высоких. То есть после насыщения накопленного запаса потребность в новом цементе и объемы его производства будут примерно равны выбытию.

В перспективе возможны разные сценарии динамики накопленного запаса цемента в мире на душу населения: от медленного роста до 15 т/чел. с последующим замораживанием на этом уровне в 2070-2100 гг. до удвоения с достижением отметки 26.5 т/чел. к 2100 г. Согласно логике модели Сао et al. (2020), еще до выхода запаса на уровень насыщения потребление цемента стабилизируется и начинает снижаться. Динамика глобального производства цемента в этом прогнозе имеет 30-летний цикл. Восходящая фаза цикла закончилась в 2013-2014 гг. В 2015-2030 гг. ожидается относительно низкий спрос на цемент, а в 2030-2045 гг. может начаться новая восходящая фаза. Это единственный прогноз, отражающий циклическую динамику производства цемента. Спад производства в 2020-2030(35) гг. согласуется с логикой стабилизации производства цемента в последние годы, но в реальности глубокий

спад, отраженный в этом прогнозе, пока не наблюдается; скорее, можно говорить о замедлении роста глобального производства цемента.

Оценки мирового спроса на цемент на 2050 г. в основном находятся в диапазоне 3.6-5 млрд т и отличаются допущениями о возможности повысить эффективность использования цемента и бетона. Согласно прогнозу GCSA (2021b), потребность в цементе вырастет почти до 6 млрд т. По прогнозу Statista, производство цемента уже к 2030 г. вырастет до 4.83 млрд т. В сценариях МЭА (IEA, 2021a) прогнозы роста потребления цемента более сдержанные. Главная причина – снижение абсолютного потребления цемента в Китае после выхода на пик и повышение эффективности использования цемента.

В работе 2018 г. МЭА ожидало, что рост спроса на цемент (на 12-23%, или до 4682-5100 млн т) будет отставать от роста численности населения (34%) и что будет происходить конвергенция уровней удельного расхода цемента на душу населения. Только в Китае при снижении удельного расхода ожидалось, что этот показатель к 2050 г. будет все еще вдвое выше среднемирового значения. Для мира в целом этот показатель снизится с 575 кг в 2014 г. до 485 кг и стабилизируется на этом уровне. В работе МЭА Energy Technology Perspective (2020) перспективные уровни производства цемента установлены равными 4.2-5 млрд т в 2050 г. и 4.6-4.8 млрд т в 2070 г. (рис. 4). В работе МЭА (2021), по сценарию Net Zero Energy (IEA, 2021a), потребность в цементе останется практически на нынешнем уровне: сначала растет до 4.25 млрд т к 2030 г., а затем падает до 4 млрд т к 2050 г.

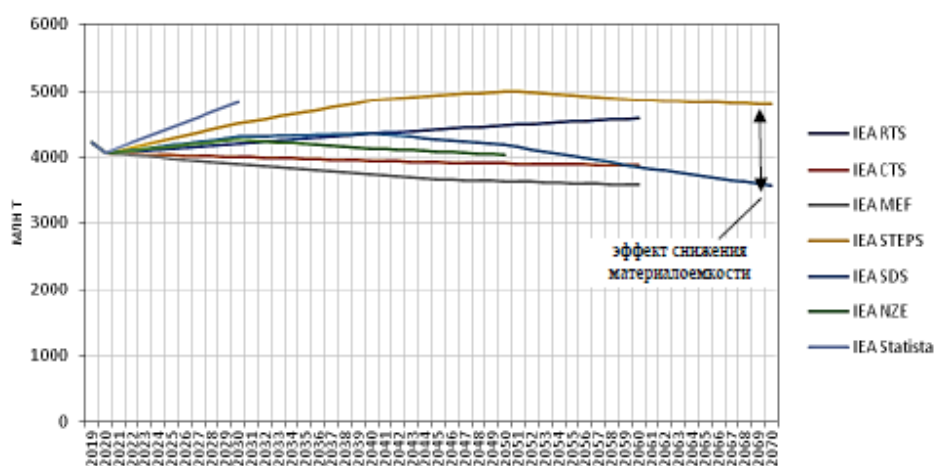


Рисунок 4. Перспективные объемы мирового производства цемента (IEA, 2020a; IEA, 2019)

Figure 4. Projections of global cement production (IEA, 2020a; IEA, 2019)

В Китае и многих развитых странах потребление цемента будет снижаться. В ряде развивающихся стран, например, в Индии, ожидается рост подушевого потребления цемента за счет необходимости удовлетворения потребностей в строительстве зданий и развитии инфраструктуры. Ожидается, что производство цемента в Индии до 2030 г. будет расти на 6% в год и прибли-

зится к 600 млн т. К 2050 г. в Индии ожидается выход подушевого потребления цемента на средний мировой уровень, а производство цемента может вырасти до 1200-1600 млн т (ВЕЕ, 2018). К середине века Индия может стать основным производителем цемента в мире, оттеснив Китай на второе место.

С большой вероятностью мировое потребление клинкера до 2050 г. расти не будет. Клинкер является основным ингредиентом цемента. Отношение клинкер/цемент определяется нормативами, устанавливающими требования по механическим и прочностным свойствам бетона в разных направлениях его использования. Обычный портландцемент содержит более 90% клинкера, гипс и измельченный известняк. В 2015-2020 гг. отношение клинкер/цемент падало в среднем на 1.6%⁵⁾ в год, достигнув 0.72 в 2020 г. В перспективе ожидается снижение этого отношения до 0.57-0.66 к 2050 г. и до 0.6 к 2070 г. за счет широкого использования альтернативных цементов и заменителей клинкера, включая промышленные отходы, такие, как шлак и летучая зола. Однако в долгосрочной перспективе альтернативными заменителями клинкера могут стать широкодоступные материалы – кальцинированная глина в сочетании с известняком, – поскольку декарбонизация производства электроэнергии, чугуна и стали снизят доступность отходов сжигания топлива. Несколько альтернативных связующих материалов уже коммерчески доступны, хотя их использование до сих пор было ограничено. Инновационная технология с очень низким потенциалом выбросов, разработанная Solidia Technologies, – карбонизация силикатов кальция – запущена на первом коммерческом предприятии в 2019 г.

В 2020 г. производство клинкера составило почти 3 млрд т. При мировом спросе на цемент в 2050 г. в диапазоне 3.6-6 млрд т производство клинкера в 2050 г. составит 2.1-3.6 млрд т. Если отношение цемент/клинкер в 2050 г. будет равно 0.6, то из 3 млрд т клинкера можно будет произвести 5 млрд т цемента. Это соответствует верхней зоне диапазона прогноза потребности в цементе до 2070 г. Ожидается, что при производстве цемента существенно – до четверти – вырастет доля добавок известняка и обожженной глины. Важным заменителем клинкера в цементе является измельченный известняк. Его использование в составе цемента позволяет снизить потребность в воде при приготовлении бетона, что повышает производительность при его укладке. Массовое содержание известняка в отдельных видах цементов достигает 25-35%, а потенциально может быть повышено до 50%, но только в сочетании со специальными мерами в процессах производства цемента и на этапе использования бетона. Обожженная глина давно используется при производстве цемента, но при использовании больших порций обожженной глины из-за более медленной кинетики реакции по сравнению с клинкером прочность бетона на сжатие снижается. Новые разработки показывают, что без потери качества бетона оптимизация пропорций обожженной глины и измельченного известняка позволяет снижать долю клинкера в цементе до 50%.

⁵⁾ IEA (<https://www.iea.org/reports/tracking-cement-2020>).

Динамика потребления бетона будет повторять динамику потребления цемента, и в 2050 г. объем его потребления составит 22-37 млрд т. По оценке USGS, потребление бетона в мире в 2020 г. составило 25.8 млрд т, что в 6.3 раза больше производства цемента. По оценке GCCA, потребление бетона в 2020 г. было равно 14 млрд м³ (GCCA, 2021). Удельный вес бетона находится в диапазоне 1.8-2.5 т/м³, тогда потребление бетона получается равным 25-35 млрд т. По оценкам USGS и GCCA, средний удельный вес бетона равен 1.84 т/м³. По оценке Global Concrete Report (2021), потребление бетона в 2020 г. было равно 10 млрд м³. При использовании удельного веса 2.5 т/м³ потребление бетона получается равным 25 млрд т. Согласно прогнозу GCCA, потребность в бетоне без мер по повышению эффективности его использования вырастет до 20 млрд м³ (37 млрд т), или на 43%. Других долгосрочных прогнозных оценок производства бетона в мире нет.

На долю цемента приходится 7-14% суммарной массы бетона. В базе данных университета Бата используется показатель 12%. Средние оценки для зданий Китая также дают пропорцию, близкую к 12%. Примерно 80% цемента используется для производства бетона, остальное – на цели производства строительных растворов и асбоцементных изделий. Фактический множитель равен среднему отношению за последние 20 лет – 6.2 (0.8*7.75). Тогда прогнозы потребления бетона равны прогнозам потребления цемента, умноженным на коэффициент 6.2, или 22-37 млрд т.

Низкие варианты прогнозов потребности в цементе реализуются только в случае заметного повышения эффективности использования цемента и бетона. Основной принцип снижения материалоемкости заключается в использовании меньшего количества материалов для обеспечения заданных свойств продуктов или услуг. Повышение эффективности использования материалов достигается за счет снижения потерь на всех стадиях производства (возврат клинкерной пыли, снижение потерь цемента и бетона на стройках). Заметный эффект дают изменения в проектировании и архитектуре (снижение избыточных требований к запасу прочности, в т.ч. за счет роста наборов типоразмеров готовых конструкций; использование при строительстве зданий заменителей бетона (стекла, стальных, алюминиевых и деревянных конструкций), замена бетона другими материалами при строительстве несущих стен и конструкций. Бетон должен использоваться там, где нужна прочность на сжатие и устойчивость к коррозии, сталь – там, где нужна высокая прочность на кручение, сдвиг и растяжение, а использование недорогих материалов (камень, кирпич, дерево, гипсокартон) – для стен с меньшей нагрузкой (Bataille, 2020). На стадии утилизации (за счет разрешения повторного использования неразрушаемых компонентов) можно повторно использовать такие конструктивные элементы, как плиты и блоки, если конструкции были возведены из секций с точками крепления и возможностью последующего перемещения. По оценкам МЭА, на уровне 2050 г. применение таких мер позволит снизить потребность в бетоне на 16%, а к 2070 г. – на 26%. В 2050 г. за счет этих мер потребность в бетоне может снизиться на 20% (GCCA, 2021b).

Оценка мировых тенденций в области выбросов парниковых газов от цементной промышленности

По охватам 1+2⁶⁾ на производство цемента в 2019-2021 гг. пришлось немногим более 3 ГтСО₂экв., или 17% всех выбросов ПГ от промышленности и 5% всех глобальных антропогенных выбросов ПГ. Выбросы от сжигания топлива при производстве цемента, по разным оценкам, составили 0.86-1 ГтСО₂экв., от промышленных процессов – 1.6-1.77 ГтСО₂экв.⁷⁾, а от используемой в отрасли электрической и тепловой энергии – еще 0.21-0.26 ГтСО₂экв. Выбросы от производства цемента – это в основном выбросы СО₂. В представленных расчетах не учтены выбросы от добычи природного сырья, топлива и транспортировки как этих ресурсов, так и цемента. С учетом этих составляющих выбросы от цементной промышленности, по-видимому, достигают 3.3 ГтСО₂экв.

Учет нетто-выбросов в цементной промышленности осложняется тем, что в своем цикле жизни бетон является поглотителем СО₂ – повторная карбонизация (эффект губки) всеми цементосодержащими продуктами. Ежегодные масштабы поглощения СО₂ за счет эффекта «губки» равны 0.6-0.9 ГтСО₂ (Cao et al., 2020; Guo et al., 2021; GCSA, 2021; Xi et al., 2016). Это только немногим меньше выбросов от сжигания топлива (рис. 5). Из-за щелочной природы и высокого содержания кальция в цементах они служат СО₂ абсорбирующим агентом посредством процессов карбонизации. Такое поглощение углерода бетоном позволяет компенсировать часть выбросов СО₂ при производстве цемента. Есть предложения включить поглощение углерода цементосодержащими продуктами в методологию МГЭИК для национальных инвентаризаций парниковых газов. (Strippel et al., 2018). Таким образом, нетто-выбросы СО₂ от цементной промышленности снижаются до 2.1-2.4 ГтСО₂экв. В 2019-2020 гг. было произведено 4197 и 4281 млн т цемента. По оценкам, в 2021 г. производство выросло до

⁶⁾ Согласно европейскому стандарту «EN 19694-3-2016 Stationary source emissions – Determination of greenhouse gas (GHG) emissions in energy-intensive industries – Part 3: Cement industry», при производстве цемента присутствуют следующие выбросы парниковых газов. (1) Прямые выбросы ПГ (область охвата 1) из источников, которые принадлежат организации или контролируются ею, например выбросы из следующих источников: прокаливание карбонатов и сжигание органического углерода, содержащегося в сырье; сжигание печного топлива (ископаемое печное топливо, альтернативное ископаемое топливо, смешанное топливо с содержанием биогенного углерода, биомассы и биожидкостей), связанное с производством клинкера и/или сушкой сырья и топлива; сжигание непечного топлива, связанное с оборудованием и транспортными средствами на объекте, отопление/охлаждение помещений; сжигание топлива для производства электроэнергии на месте; сжигание углерода, содержащегося в сточных водах. (2) Энергетические косвенные выбросы ПГ (область охвата 2) в результате производства покупной электроэнергии, потребляемой на принадлежащем или контролируемом организацией оборудовании. (3) Прочие косвенные выбросы ПГ (область охвата 3) от закупаемого клинкера, а также связанные с производством, подготовкой и транспортировкой альтернативного топлива за пределами организации.

⁷⁾ Из которых 818 млн т СО₂ приходится на Китай (Liao et al., 2022).

4.4 млрд т.⁸⁾ Накопленный в 2021 г. запас цемента превышает 100 Гт. Таким образом, ежегодно бетонная «губка» впитывает 0.006-0.009 тСО₂/т накопленного запаса бетона.

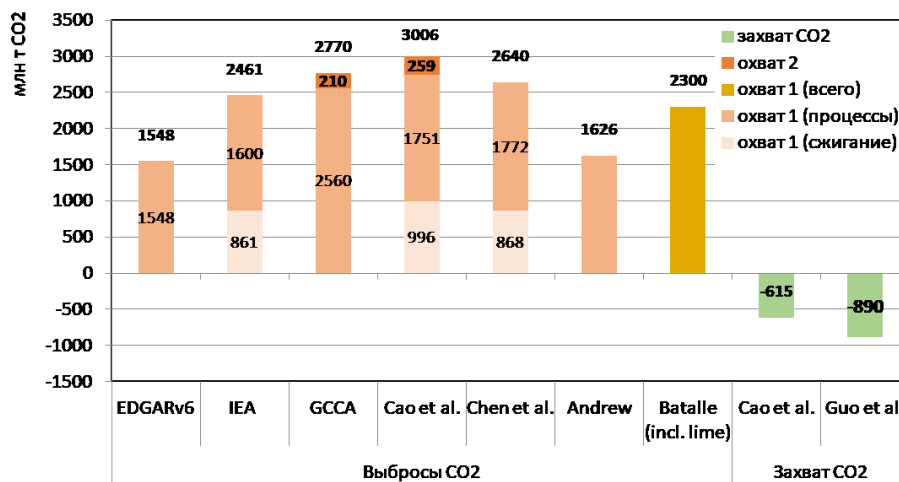


Рисунок 5. Прямые и косвенные выбросы ПП от мировой цементной промышленности в 2019-2020 гг. (Построено автором на основе данных Andrew, 2019; Cao et al., 2020; Chen et al., 2022. Crippa et al., 2021; GCCA, 2021a; IEA, 2020; IEA, 2021a; Lamb et al., 2021)

Figure 5. CO₂ emissions from global cement production by scopes in 2019-2020 (Built by author based on: Andrew, 2019; Cao et al., 2020; Chen et al., 2022; Crippa et al., 2021; GCCA, 2021a; IEA, 2020; IEA, 2021a; Lamb et al., 2021)

В среднем по миру удельные выбросы при производстве 1 т цемента по охватам 1 и 2 равны 639-647 кгСО₂, а клинкера – 820 кгСО₂. При делении данных по суммарным выбросам СО₂ на объемы производства цемента по охвату 1 удельные выбросы получаются равными 596-602 кг СО₂/т цемента, а по охвату 1+2 – 639-647 кг СО₂/т цемента. По оценкам МЭА, средние по миру удельные выбросы в 2020 г. были равны 590 кгСО₂/т цемента.⁹⁾ По данным GCCA, на основе выборки из 22% цементных заводов мира в 2019 г. средние выбросы равны 635 кгСО₂/т цемента и 834 кг СО₂/т клинкера (GCCA, 2021a). Однако данные GCCA не включают Китай, на долю которого приходится более 50% производства цемента в мире. Анализ данных по 1574 цементным предприятиям Китая показал (Cai et al., 2016), что (рис. 6):

- удельные технологические выбросы в среднем составили 516 кг СО₂/т клинкера и в основном варьировали в пределах 500-600 кг СО₂/т клинкера;
- удельные выбросы от сжигания топлива составили 348±242 кгСО₂/т клинкера;

⁸⁾ Cement production global 2021 | Statista

⁹⁾ Cement – Analysis – IEA

- средние удельные выбросы охвата 1 по всем цементным предприятиям Китая в 2013 г. составили 806 кгCO₂/т клинкера, что было на 35 кгCO₂/т клинкера ниже среднего мирового уровня;
- удельные выбросы для 20% лучших предприятий составили 751 кгCO₂/т клинкера, а для отдельных предприятий были ниже 500 кгCO₂/т клинкера.

При значении клинкер-фактора для Китая в 2015-2020 гг. в диапазоне 0.57-0.66¹⁰⁾ средние удельные выбросы на 1 т цемента для охвата 1 получают равными 459-532 кгCO₂/т цемента, что заметно ниже средних по миру показателей.

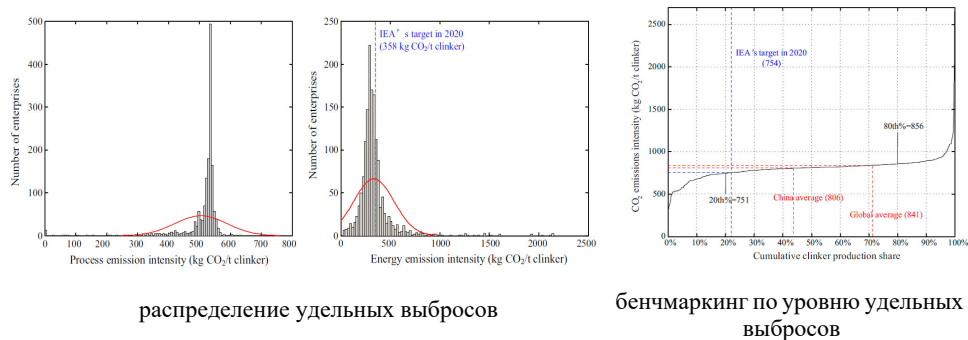


Рисунок 6. Распределение удельных выбросов CO₂ на 1 т клинкера в Китае (Cai et al., 2016)

Figure 6. Distribution of specific CO₂ emissions per t of clinker in China (Cai et al., 2016)

В структуре выбросов ПГ при производстве цемента доминируют прямые выбросы (охват 1) – 92-94%, а в прямых выбросах доминируют технологические выбросы – 64-67%. Мультипликатор прочих косвенных выбросов парниковых газов (область охвата 3) к сумме выбросов по охватам 1 и 2 равен 10-32%.

По охватам 1+2 выбросы ПГ от производства цемента в 1970-2021 гг. выросли в 6 раз (рост на 3.6% в год). Основной рост пришелся на 2000-2014 гг., когда выбросы взлетели в 2.2 раза (рост на 5.9% в год). После 2014 г. вслед за стабилизацией производства цемента стабилизировались и сопряженные с этим выбросы ПГ (рис. 7). В оценках выбросов ПГ от цементной промышленности есть неопределенность. Оценка роста выбросов ПГ от цементной промышленности за 91 год (1930-2021 гг.) в 46 раз должна восприниматься с учетом этой неопределенности (рис. 7).¹¹⁾ В целом, динамика выбросов следовала за динамикой производства цемента, которая после 2000 г. во многом определялась его производством в Китае.

¹⁰⁾ Cement – Analysis – IEA

¹¹⁾ В значительной степени она отражает неопределенность оценок выбросов от промышленных процессов в Китае. См. Liao et al., 2022.

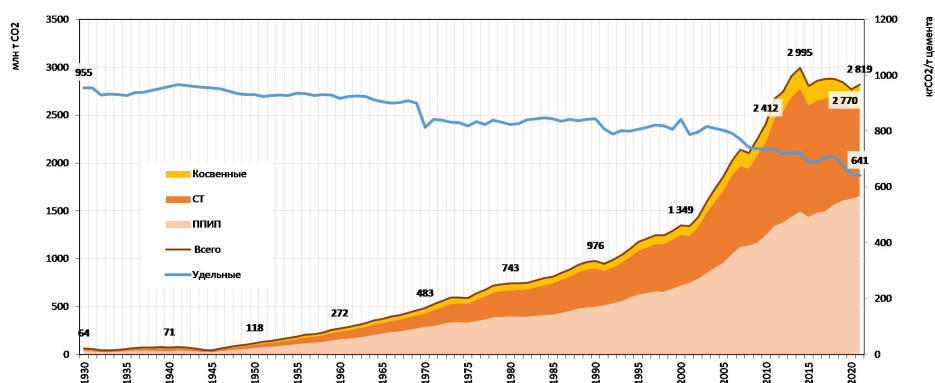


Рисунок 7. Динамика выбросов ПГ от мировой цементной промышленности в 1930-2021 гг.
* СТ – сжигание топлива; ПИИП – производственные процессы и использование продуктов;
Источники: Построено автором на основе данных Andrew, 2019; Cao et al., 2020; Chen et al., 2022; Guo et al., 2021; Lamb et al., 2021; Minx et al., 2021; IEA, 2021d; IEA, 2021b; IEA, 2021a; Worrell et al., 2001)

Figure 7. Global cement industry GHG emissions in 1930-2021

* СТ – fuels combustion; ПИИП – industrial processes

(Built by the author based on: Andrew, 2019; Cao et al., 2020; Chen et al., 2022; Guo et al., 2021; Lamb et al., 2021; Minx et al., 2021; IEA, 2021d; IEA, 2021b; IEA, 2021a; Worrell et al., 2001)

Для цементной промышленности несправедлив тезис о стагнации углеродоемкости, но справедлив тезис о ее очень медленном снижении. Стагнация в расчете на 1 т цемента наблюдалась в 1970-2000 гг. Затем средние данные по миру показывают заметное – на 20% – снижение удельных выбросов на производство цемента в 2000-2021 гг., тогда как выборочные данные по цементным заводам, производящим 22-24% цемента, показывают, что удельные выбросы CO₂ на 1 т клинкера в 2000-2019 гг. снизились только на 4%, а на 1 т цемента – на 14%, или на 0.8% в год за счет снижения отношения цемент/клинкер с 82% в 2000 г. до 75% в 2019 г. и снижения углеродоемкости используемой энергии на 5% благодаря сокращению доли используемого ископаемого топлива с 95% до 81%.

Масштаб предстоящего снижения удельных выбросов ПГ, необходимый для решения задачи полной декарбонизации мировой цементной промышленности, не имеет прецедента в новой истории. Для достижения полной декарбонизации требуется снизить удельные выбросы CO₂ на 639-647 кгCO₂/т цемента (по охвату 1+2). По нашей оценке, в 1930 г. этот показатель был равен 955 кг CO₂/т цемента, а снижение в 1930-2021 гг. составило 288 кг CO₂/т цемента. Если допустить, что в 1930 г. средний мировой показатель соответствовал одному из самых худших из нынешних показателей среди китайских предприятий (около 1500 кгCO₂/т клинкера, см. рис. 6), то при клинкер-факторе, равном в 1930 г. 95%, удельные выбросы получаются равными 1425 кгCO₂/т цемента. Только при таком допущении получается, что искомый масштаб снижения уже имел прецедент в истории, но на это ушло 90 лет.

Перспективная динамика выбросов парниковых газов от цементной промышленности

Традиционный пакет мер по снижению выбросов ПГ – снижение удельного потребления топлива на 1 т клинкера; снижение удельного расхода электроэнергии на 1 т цемента; использование альтернативных топлив; снижение отношения клинкер/цемент – в цементной промышленности имеет ограниченный потенциал (20-50%) в плане снижения выбросов ПГ (рис. 8). Если не учитывать прогресс в повышении эффективности использования бетона и цемента, то потенциал ограничен 20-25%. За счет снижения материалоемкости он повышается до 40-50%.

Глубокая декарбонизация цементной промышленности возможна в основном за счет снижения материалоемкости, замещения клинкера другими материалами и отходами, а также за счет масштабного применения технологии CCUS. Практически во всех сценариях доминирует технология CCUS и все экспертные группы согласны с тем, что вклад прочих факторов будет ограниченным (табл. 2).

Таблица 2. Оценки возможного вклада отдельных мер по декарбонизации мировой цементной промышленности к 2050 г. (Climate Action Tracker, 2020; CEMBUREAU, 2020; GCCA, 2021; IEA, 2018; IEA, 2020)

Table 2. Contributions of major factors to global cement industry decarbonization (Climate Action Tracker, 2020; CEMBUREAU, 2020; GCCA, 2021; IEA, 2018; IEA, 2020)

| Наименование показателя | Ед. изм. | Источник | 2020 (факт) | 2030 | 2050 |
|--|----------------------|-----------|-------------|------------|----------|
| Производство цемента | Мт | МЭА | 4281 | 4350 | 4682 |
| Соотношение «клинкер/цемент» | % | МЭА | 72% | 64% | 60% |
| | | CAT | | 55% | 50% |
| | | GCCA | 63% | 58% | 52% |
| | | CEMBUREAU | 77% | 74% | 65% |
| Энергоемкость производства клинкера | ГДж/т клинкера | МЭА | 3.5 | 3.3 | 3.1 |
| | | CAT | | 3.3-3.5 | 3.0-3.3 |
| Электроемкость производства цемента | кВт-ч/т цемента | МЭА | 91 | 87 | 79 |
| Использование альтернативного топлива (биомасса, отходы) | % | МЭА | 5.6% | 10.9-17.5% | 17.5-30% |
| | | CAT | | 15-45% | 55-60% |
| | | GCCA | 6% | 22% | 43% |
| | | CEMBUREAU | | 60% | 90% |
| Доля электропечей | % | CAT | | 3-6% | 34% |
| Доля улавливания CO ₂ при использовании технологии CCUS | % | CAT | - | 10-12% | 65-76% |
| Доля новых видов цемента | % | CAT | | 2-5% | 30% |
| | | GCCA | | 1% | 5% |
| Улавливание CO ₂ | млн тCO ₂ | МЭА | | 7-14 | 83-552 |

| Наименование показателя | Ед. изм. | Источник | 2020 (факт) | 2030 | 2050 |
|---|-----------------------------|----------|-------------|-----------|------------|
| Использование водорода | % | САТ | - | 0.4-0.9% | 6% |
| Удельные выбросы CO ₂ при производстве цемента | тCO ₂ /т цемента | САТ | 0.615 | 0.36-37 | 0.055-0.09 |
| | | МЭА | 0.59 | 0.52 | 0.37 |
| Удельные технологические выбросы CO ₂ | тCO ₂ /т | МЭА | 0.34 | 0.33-0.34 | 0.24-0.33 |
| Удельные энергетические выбросы CO ₂ | тCO ₂ /т | МЭА | 0.2 | 0.19 | 0.13-0.17 |

Примечания. *CEMBUREAU только для ЕС; Источники: Climate Action Tracker, 2020; CEMBUREAU, 2020; GCCA, 2021; IEA, 2018; IEA, 2020.

Основными направлениями декарбонизации цементной промышленности являются изменение поведения потребителей (контроль за уровнем потребления – *sufficiency*), повышение эффективности использования цемента и бетона, использование альтернативных клинкеру материалов, повышение энергоэффективности, электрификация, декарбонизация используемых электрической и тепловой энергии, использование альтернативных видов топлива, включая биомассу, водород и применение технологии CCUS (рис. 8). К этому списку можно добавить снижение выбросов охвата 3 на стадиях добычи природных ресурсов, снижение выбросов от транспортировки сырья и готовой продукции (охват 3). Пропорции вкладов групп мер зависят от технологических возможностей и стоимости технологических решений. Из-за высокой доли технологических выбросов эффекты от многих мер не позволяют обеспечить глубокое снижение выбросов от цементной промышленности без масштабного использования технологий CCUS (рис. 8).

Переход к достаточности и разумному потреблению – это снижение потребности в площади зданий, инфраструктуре и в материалах за счет стимулирования разумного их потребления или контроля потребления. Имеются в виду самоограничения по площади жилья, совместное использование зданий и сооружений. Такие меры могут привести к существенному снижению потребности в цементе в развитых странах (Hertwich et al., 2019; IRP, 2020). Однако это может негативно сказаться на темпах экономического роста вплоть до перехода к стадии сжатия экономики (*degrowth*). За счет снижения материалоемкости, включая эффективный дизайн и архитектуру зданий и экономии материалов во всех звеньях технологической цепочки, включая строительство, выбросы ПГ к 2050 г. можно снизить на 15-33%. Для ЕС максимальные возможности сокращения потребления цемента за счет снижения материалоемкости оцениваются в 65% (Material Economics, 2019). Часть этого потенциала лежит в сфере оптимизации использования цемента при производстве бетона за счет снижения норм расхода бетона для обеспечения необходимых свойств конструкций. Поскольку цемент – относительно дешевый материал, эти нормы, как правило, завышены. Другая часть – это повышение эффективности использования цемента при приготовлении бетона за счет использования достаточно мелких частиц для заполнения пространства

между наполнителями, что позволяет снизить расход вяжущего цемента на треть (до 8 кг/1 м³ бетона и даже ниже) по сравнению с текущим средним мировым показателем (12-15 кг/1 м³ бетона). Другая часть потенциала связана с оптимизацией при проектировании зданий, снижением отходов и потерь бетона. Сокращение выбросов CO₂, достижимое за счет оптимизации при проектировании и строительстве, оценивается на уровне 22% в 2050 г. (GCCA, 2021b). По миру в целом оптимизация производства бетона с точки зрения использования связующего может привести к сокращению спроса на связующее на 5% и 14% в 2030 и 2050 годах соответственно (GCCA, 2021b).

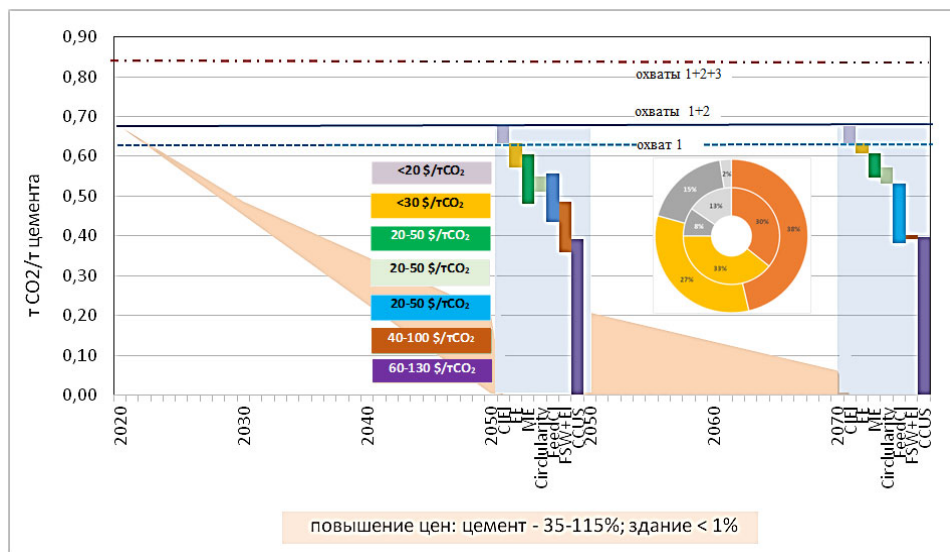


Рисунок 8. Вклад отдельных мер по декарбонизации цементной промышленности на перспективу до 2050-2070 гг.; CIEI – снижение углеродоемкости электрической и тепловой энергии; EE – повышение энергоэффективности; ME – снижение материалоемкости; Circularity – использование строительных блоков и отходов для строительства новых объектов; FeedCI – замена клинкера и использование бесклинкерных цементов; FSW+EL – замена ископаемых топлив и электрификация технологических процессов; CCUS – захват, использование и хранение углерода (Bashmakov et al., 2022, модифицировано)

Легенда для круговой диаграммы по уровню готовности технологий

■ Прототип ■ Демонстрация ■ Раннее применение ■ Зрелая

Внутренний круг – 2050 г., внешний – 2070 г.

Figure 8. Potentials and costs for zero-carbon mitigation options for global cement industry; CIEI – carbon intensity of electricity for indirect emissions; EE – energy efficiency; ME – material efficiency; Circularity – material flows (clinker substituted by coal fly ash, blast furnace slag or other by-products and waste, etc.); FeedCI – feedstock carbon intensity (hydrogen, biomass, novel cement, natural clinker substitutes); FSW+El – fuel switch and processes electrification with low-carbon electricity (Bashmakov et al., 2022, modified)

Legend for the circle diagram

■ Prototype ■ Demonstration ■ Early adoption ■ Mature

Inner circle – 2050, outer circle – 2070

Возможности снижения выбросов ПГ за счет увеличения повторного использования бетонных конструкций ограничены и, по-видимому, не превышают 1-2%. Возможно, со временем в этом направлении будет достигнут

большой прогресс. Такие материалы, как мелкодисперсный переработанный бетон, не выделяют CO₂ при нагревании, поскольку он из них уже удален (GCCA, 2021b). Если при проектировании зданий и сооружений будут предусмотрены возможности повторного использования бетонных блоков после их демонтажа, то доля повторного использования бетона может повыситься.

Замена клинкера альтернативными материалами (уменьшение соотношения клинкер/цемент) позволит снизить выбросы ПГ на 7-10%. В расчетах, показанных на рис. 8, предполагается снижение отношения цемент/клинкер только до 73% к 2050 г. в тех регионах мира, где оно выше. Согласно оценкам МЭА, отношение клинкер/цемент снизится до 64% в 2030 г. и до 60% в 2050 г. (IEA, 2018). Потенциально оно может быть снижено до 50% к 2050 г. или позже (IEA, 2020; 2021a) – к 2050 г. Материалы, которые могут заменить клинкер в цементе, должны обладать требуемыми физико-химическими свойствами, быть доступны, иметь низкую цену. Объемы таких альтернативных материалов, как гранулированный доменный шлак и летучая зола, к 2050 г. сократятся. Их заменят известняк и кальцинированная глина. GCCA прогнозирует, что альтернативы клинкерным порландцементом составят 5% в 2050 г., что будет способствовать сокращению выбросов на 0.5% (GCCA, 2021b). Технологические выбросы CO₂, выделяемые при обжиге сырья, для многих материалов ниже, чем для алита, который составляет 40-80% массы клинкера.

Повышение эффективности использования энергии в цементной промышленности – это самый технически подготовленный и сравнительно дешевый способ снижения выбросов ПГ. Во многих отраслевых дорожных картах декарбонизации это выбор номер один. Именно этому направлению уделялось особое внимание в последние 40-45 лет. Отчасти поэтому ресурс повышения энергоэффективности при производстве клинкера уже во многом выбран (IPCC, 2014). Китайская и индийская цементная промышленность, на долю которой приходится львиная доля всего производства цемента в мире, является одной из самых энергоэффективных в мире.

Вклад мер по снижению удельного потребления топлива в перспективе ограничен, и по мере продвижения в будущее его роль снижается. Эти меры могут дать 3-7% снижения выбросов ПГ. Постепенное приближение удельных расходов энергии к термодинамическому минимуму ограничивает возможность дальнейшего снижения удельных расходов топлива на производство клинкера. Во многих странах, использующих устаревшее оборудование, включая Россию, максимальные значения удельных расходов заметно выше как среднего мирового уровня, так и Ват. Там потенциал снижения удельного расхода топлива выше. Согласно оценкам МЭА (IEA, 2018), к 2030 г. средний удельный расход топлива на производство клинкера снизится до 3.1-3.3 ГДж/т. В 2014 г. лучшие показатели для Индии составили 2.83 ГДж/т клинкера. В Китае за счет роста доли использования глин удельные расходы снизятся к 2030 г. несколько в меньшей степени – до 3 ГДж/т клинкера. Теоретическая минимальная потребность в энергии равна 1.852.80 ГДж/т клинкера. Она определяется химическими и минералогическими свойствами сырья и его влажностью (IEA, 2018; ECRA, 2017). Вклад повышения энерго-

эффективности частично нейтрализуется дополнительными потребностями в энергии для применения других мер по снижению выбросов CO_2 . Рост доли использования альтернативных низкокалорийных видов топлива увеличивает удельный расход топлива на 0.11 ГДж/т клинкера к 2050 г. Снижение отношения клинкер/цемент может порождать дополнительную потребность в энергии, например, для обжига сырых глин на 0.35 ГДж/т клинкера к 2050 г. (IEA, 2018). Меры по снижению удельного расхода электроэнергии могут дать 5-7% снижения выбросов ПГ. Согласно оценкам МЭА, к 2030 г. средний удельный расход электроэнергии снизится до 87 кВт-ч/т цемента (IEA, 2018). В 2014 г. лучшие показатели для Индии составили 64 кВт-ч/т цемента. В Китае поставлена цель снизить удельный расход до 77 кВт-ч/т цемента к 2030 г. Оснащение цементных предприятий установками CCS порождает дополнительную потребность в электроэнергии в размере 15-19 кВт-ч/т цемента, или на 19-24% от ожидаемой электроемкости цемента в 2050 г.

В сумме за счет повышения энергетической эффективности производства клинкера и цемента (сокращение энергоемкости и электроемкости) выбросы ПГ могут быть снижены на 7-12%. При реализации этого направления предполагается использовать: вращающиеся сушильные печи для сухого и комбинированного способа производства цемента; модернизированные сушильные печи со ступенчатыми подогревателями и прекальцинаторами (усовершенствованными подогревателями сырьевой смеси); помол цемента с помощью высокоэффективных вертикальных валковых мельниц (VRM) или мелющих валков высокого давления (HPGR); добавление в состав сырьевой смеси специальных веществ (минерализаторов), которые улучшают ее состав и понижают температуру, при которой образуется клинкер. Реализация этих технологий позволит сократить энергоемкость клинкера в 2030-2050 гг. с нынешних 3.3 до 2.9-3.1 ГДж/т клинкера (IEA, 2021a). Повышение энергетической эффективности цементных производств позволит снизить прямые выбросы ПГ к 2050 г. на 0.26 Гт CO_2 , или на 12% от совокупных выбросов ПГ мировой цементной промышленностью.

Потенциал выработки электроэнергии за счет использования вторичного тепла ограничен уровнем 8-25 кВт-ч/т клинкера и зависит от процесса и технологии печи. Из системы охлаждения можно получить 8-10 кВт-ч/т клинкера при условии низкого уровня влажности сырья, что снижает потребность в использовании вторичного тепла для его сушки (BEE, 2018). Технологии использования вторичного тепла для производства электроэнергии мало используются в цементной промышленности. Они применяются в основном в Китае, Индии, Японии и Корее (IEA, 2018).

Потенциал экономии энергии выше в странах с относительно старым оборудованием. Например, для США он оценен в 22% (US DOE, 2017). Основная его часть (83%) – на стадии обжига клинкера и его охлаждения. Еще 10% – на конечной стадии производства цемента и 7% – на измельчении сырья. Доведение удельного расхода до термодинамического минимума для всех процессов позволило бы увеличить потенциал экономии энергии в США почти до 24% (US DOE, 2017). Даже в Индии, с ее одними из самых энергоэф-

фективных цементных заводов в мире, существует потенциал экономии энергии на 11% за счет замены клинкера и на 7% за счет перехода на другие виды топлива (Mishra et al., 2022). Значительная часть мер по повышению энергоэффективности имеет низкие капитальные затраты (IFC, 2017), окупается в сроки до 7 лет.¹²⁾ Стоимость снижения выбросов CO₂ для отдельных мер отрицательная, поскольку оно окупается за счет экономии энергии, и практически для всех мер не превышает 30 долл./тCO₂.

Возможный вклад декарбонизации электроэнергии равен 5-10%. При нынешнем среднем расходе электроэнергии 100 кВт-ч/т цемента (GCCA, 2021b) и углеродоемкости электроэнергии 500 гCO₂/кВт-ч (IEA, 2021a) вклад косвенных выбросов охвата 2 равен 50 кгCO₂/т цемента. Это максимум снижения при полной декарбонизации электроэнергетики к 2050 г. Однако ожидается, что удельный расход электроэнергии к 2050 г. снизится до 80 кВт-ч/т цемента, поэтому на уровне 2050 г. снижение будет несколько меньшим. По оценкам GCCA, косвенные выбросы CO₂ от потребляемой электроэнергии снизятся на 54% к 2030 г. и на 100% к 2050 г. (GCCA, 2021b).

Электрификация термических процессов, использование водорода и переход на альтернативные виды топлива (биомасса, отходы) позволит снизить выбросы ПГ на 5-22%. Только меры по повышению доли использования альтернативных топлив могут дать 3-5% снижения выбросов ПГ. При сжигании биомассы происходит существенное снижение выбросов ПГ, но ресурсы биомассы и потенциал их использования в цементной промышленности ограничены, и за них, а также за земельные площади для их выращивания, идет конкуренция с другими секторами (сельское и лесное хозяйство, электроэнергетика, транспорт, другие отрасли промышленности, здания). В отношении сжигания отходов снижение выбросов ограничено эффектом от снижения выбросов при их захоронении, поскольку удельные выбросы при сжигании многих видов отходов близки к удельным выбросам от сжигания ископаемого топлива. По мере развития циркуляционной экономики и общественного транспорта (шины) часть отходов может заметно сократиться.

По одним оценкам, доля альтернативного топлива в цементной промышленности может увеличиться с 3% в 2020 г. до 30-60% в 2050 г. (IEA, 2018), а по другим – с нынешних 6% до 22% и 43% к 2030 г. и 2050 г. соответственно. К альтернативным топливам в цементной промышленности относятся: использованные шины (целые или измельченные); отработанные масла и растворители; промышленные отходы; биотопливо, полученное из древесных отходов, а также из отходов пластмассы, текстиля и бумаги, не подлежащих вторичной переработке; биотопливо, полученное из твердых бытовых отходов; биотопливо, полученное из осадков сточных вод. Не все эти виды топлива углероднейтральные, и при их сжигании может выделяться такое же количество ПГ, как и на свалках, но их использование замещает сжигание ископаемого топлива, поэтому получается общий положительный эффект. В цементных печах можно использовать до 100% альтернативного топлива,

¹²⁾ Из 43 мер, перечисленных в (Worrell et al., 2013), 20 имели срок окупаемости менее 7 лет.

однако существуют требования к его теплотворной способности. Например, в стандартных вращающихся сушильных печах теплотворная способность альтернативного топлива должна быть не менее 20-22 ГДж/т. В модернизированных сушильных печах с прекальцинаторами есть возможность использования низкокалорийного топлива с теплотворной способностью 10-18 ГДж/т. По оценкам МЭА в сценарии 2DS, к 2050 г. для промышленности будет доступно не более 140 ЭДж биомассы и отходов, из которых мировая цементная промышленность будет использовать только 10 ЭДж, или 7%. Ожидается, что доля использования угля снизится с нынешних 70% до 40% (IEA, 2018).

Возможности получения необходимого высокотемпературного тепла на основе использования электроэнергии в цементной промышленности еще недостаточно ясны. Технически это возможно, но пока использование электрических печей на эти цели находится в стадии исследования. В случае успеха это потребует существенной реконструкции существующих печей (UKCCC, 2019). Тем не менее, существуют оценки, что в 2050 г. 34% клинкера может быть произведено в электропечах (Climate Action Tracker, 2020).

МЭА дает осторожные оценки использования водорода в цементной промышленности, в основном в виде подмеса водорода к природному газу в газовых сетях, указывая на то, что масштабное использование водорода требует значительных изменений в оборудовании. К числу проблем относятся: высокая скорость сгорания и несветящееся пламя водорода, что затрудняет его визуальный контроль, и др. Однако Climate Action Tracker допускает возможность использования водорода для производства 6% цемента в 2050 г. (Climate Action Tracker, 2020). GCCA также допускает распространение таких инноваций, как использование водорода и электрификация печей с 2040 г. (GCCA, 2021b).

Основным направлением сокращения выбросов ПГ в цементной промышленности являются технологии CCUS, на которые, по разным оценкам, приходится 36-80% снижения выбросов в сценариях глубокой декарбонизации (рис. 8). По оценкам Climate Action Tracker, доля CCUS в сценариях полной декарбонизации может достичь 65-76% (Climate Action Tracker, 2020). Оценка GCCA на 2050 г. ниже – 36% (GCCA, 2021b). По оценкам МЭА, применение этой технологии превысит 60% кумулятивного сокращения выбросов ПГ к 2070 г. (IEA, 2020). Согласно оценкам МЭА в сценарии STEPS, в 2050 г. объем захвата и захоронения углерода ожидается на уровне более 1.2 млрд тCO₂, а к 2070 г., он вырастет до 1.4 млрд тCO₂ (рис. 8). По прогнозам GCCA, к 2050 г. будет улавливаться и утилизироваться/храниться 1370 млн тCO₂. Для обеспечения безуглеродности мировой цементной промышленности нужно, чтобы к 2050 г. 65-80% цементных заводов были оснащены системами CCUS и захватывали 30-80% выбросов CO₂ (Material Economics, 2019).

Проблема с применением технологии CCS в цементной промышленности – низкая (18-30%) концентрация CO₂ в отходящих газах (SINTEF Energi AS, 2015). Поэтому требуется значительный дополнительный расход энергии¹³⁾ и значительные затраты (табл. 3). Стоимость цемента повышается с

¹³⁾ В основном пар для регенерации сорбента.

45.3 евро/т без улавливания CO₂ до 80.7 и 70.5 евро/т цемента при доле улавливания 90 и 60% соответственно. В первом случае затраты на предотвращение выбросов составляют 63 евро/т CO₂. С учетом дополнительных выбросов, сопряженных с дополнительными затратами энергии, нетто-снижение выбросов обходится в 83 евро/т CO₂ (табл. 3). Стоимость пара составляет 37-40% от этих затрат, а электроэнергии – еще 11% (SINTEF Energi AS, 2015). На рис. 8 показано, что диапазон затрат на применение технологии CCS равен 60-130 долл./тCO₂. Мембранные технологии не требуют затрат энергии на регенерацию сорбента, но они находятся только в лабораторной стадии.¹⁴⁾

Таблица 3. Сравнение технико-экономических показателей для эталонного цементного завода с оснащением его системами CCS (SINTEF Energi AS, 2015)

Table 3. Comparison of technical and cost indicators for reference cement plant equipped with CCS systems (SINTEF Energi AS, 2015)

| Основные показатели эффективности | 0% улавливания | 90% улавливания | 60% улавливания |
|--|----------------|-----------------|-----------------|
| Энергетические и экологические показатели эффективности | | | |
| Прямое удельное потребление первичной энергии, $q_{\text{клинкер}}$ | 3135 | 6105 | 5044 |
| Прямое удельное потребление первичной энергии, $q_{\text{цемент}}$ | 2310 | 4499 | 3717 |
| Прямые удельные выбросы от трубы цементного завода, $e_{\text{клинкер}}$ | 846 | 251 | 445 |
| Прямые удельные выбросы от трубы цементного завода, $e_{\text{цемент}}$ | 623 | 185 | 328 |
| Удельное потребление электроэнергии, $P_{\text{эл. клинкер}}$ | 132 | 227 | 195 |
| Удельное потребление электроэнергии, $P_{\text{эл. цемент}}$ | 97 | 167 | 144 |
| Косвенные выбросы CO ₂ , $e_{\text{эл. клинкер}}$ | 40 | 69 | 60 |
| Косвенные выбросы CO ₂ , $e_{\text{эл. цемент}}$ | 30 | 51 | 44 |
| Выбросы CO ₂ экв., $e_{\text{клинкер экв.}} = e_{\text{клинкер}} + e_{\text{эл. клинкер}}$ | 886 | 321 | 505 |
| Выбросы CO ₂ экв., $e_{\text{цемент экв.}} = e_{\text{цемент}} + e_{\text{эл. цемент}}$ | 653 | 236 | 372 |
| Уровень захвата CO ₂ , CCR | 0% | 90% | 60% |
| Предотвращенные выбросы CO ₂ , AC | 0% | 70% | 47% |
| Предотвращенные выбросы CO ₂ экв., AC экв. | 0% | 64% | 43% |
| Экономические показатели эффективности | | | |
| Стоимость клинкера (€/т клинкера) | 61.5 | 109.7 | 95.9 |
| Стоимость цемента (€/т цемента) | 45.3 | 80.7 | 70.5 |
| Стоимость предотвращенных выбросов CO ₂ , SAC (€/тCO ₂ предотвр.) | | 83,02 | 87.9 |
| Стоимость захваченного CO ₂ (€/тCO ₂ захвач.) | | 63.2 | 67.4 |

¹⁴⁾ ECRA (European Cement Research Academy) and Cement Sustainability Initiative (CSI) (eds.) (2017), *Development of State-of-the-Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*, ECRA, Düsseldorf and Geneva, www.wbcscement.org/technology.

Утилизация улавливаемого CO_2 в цементной и бетонной промышленности может составить 3-6% от выбросов. Она включает инъекцию CO_2 во влажный бетон, захват CO_2 в процессе отверждения бетона и производство заполнителей из отходов. Если это дополнить «эффектом губки», то потенциал растёт до 23-25%. В настоящее время ведутся разработки по расширению использования этих видов стока углерода. Глобальная рекарбонизация – захват CO_2 существующими бетонными конструкциями – прогнозируется на уровне 319, 318 и 242 млн т CO_2 в 2020 г., 2030 г. и 2050 г. соответственно (GCCA, 2021b). Сао и др. (2020) дают существенно более высокую оценку дополнительного поглощения. По этой оценке, минерализация при повторной карбонизации щелочных промышленных материалов и отходов (она же «эффект губки») уже обеспечивает поглощение 0.6 Гт CO_2 в год продуктами, содержащими цемент. В 2050 г., по их данным, годовой прирост стока составит 0.7-1.7 Гт CO_2 , что соответствует 23-57% от выбросов CO_2 в 2021 г. Если бы этот эффект учитывался в инвентаризации, то для выхода на углеродную нейтральность цементной промышленности было бы достаточно снизить выбросы в 2021-2050 гг. с 3 до 0.7-1.7 Гт CO_2 , или на 43-77%. Это означает, что необходимый масштаб использования капиталоемкого CCUS можно существенно ограничить. В ряде стран уже приступили к оценке национального потенциала такого стока.¹⁵⁾

Для решения задачи глубокой декарбонизации цементной промышленности при минимальных затратах нужно использовать широкий пакет технологий. Степень рыночной готовности многих из них еще недостаточна. Наиболее продвинутыми являются технологии повышения энергоэффективности. Другие группы мер опираются на технологии, которые только начали проникать на рынок или еще не вышли из лабораторий. Поэтому на рис. 8 эффекты от этих групп технологий начинают проявляться в более поздние периоды времени. Применение этих технологий позволит существенно снизить удельные выбросы CO_2 из всех источников в цементной промышленности. Но нет единственной технологии, которая позволит декарбонизировать производство цемента к 2050-2070 гг. На роль такой технологии могла бы претендовать технология CCUS, но она находится лишь в начальной стадии коммерциализации, поэтому масштабировать ее применение можно только со временем. Кроме того, это одна из самых затратных технологий.

По имеющимся оценкам, использование новых технологий и материалов в производстве цемента приведет к его удорожанию на 70-115% (IEA, 2021c) (на 37-58 евро за тонну цемента (ЕС, 2021)). Однако такое повышение цен на цемент приводит к повышению цен на здание только на 1-2%. Во-первых, потому что доля цемента в бетоне составляет только 12-15%, а во-вторых, потому что доля стоимости бетона в продажной цене здания не превышает 10%. В целом по строительству в России последняя доля равна 6%. Таким образом, даже удвоение цен на цемент приводит к росту стоимости

¹⁵⁾ Для Испании см. (Sanjuan et al., 2020).

здания не более чем на 1.5% ($100\% * 0.15 * 0.1$). То есть для конечных потребителей рост цен на здания и сооружения ограничен. В среднем, отдельно стоящий дом с бетонным каркасом в США стоит 300 тыс. долл. При подорожании цемента его стоимость вырастет на 0.6% (IEA, 2020a). Но для поставщиков цемента при жесткой конкуренции на рынке изменение цен может заметно повлиять на размер их рыночной ниши. Правда, объем внешней торговли цементом ограничен 5% его суммарного производства. Поэтому заметное влияние роста цен на цемент может проявляться только при условии его существенного подорожания при введении механизмов с ценой на углерод только на отдельных региональных рынках, например, в ЕС. Для их защиты разрабатываются механизмы типа CBAM (Башмаков, 2022).

Цена на углерод, необходимая для обеспечения экономической привлекательности низкоуглеродного цемента, варьирует в диапазоне 60-130 долл./тCO₂. По оценкам Material Economics (2019), для ЕС это цена находится в диапазоне от 60 до 83 евро/тCO_{2экв}. По оценке МЭА, при цене около 80 долл./тCO₂ CCUS становится конкурентоспособной альтернативой. В перспективе уровень этих цен будет зависеть от сокращения затрат за счет масштабирования применения инновационных технологий, а также от уровня цен на альтернативные компоненты цемента. Однако ни одна из низкоуглеродных технологий не позволяет сохранить цены на цемент на нынешнем уровне. В зависимости от отношения клинкер/цемент необходима цена на углерод 80-130 долл./т, чтобы обеспечить конкурентоспособность этих технологий. Поэтому в сценарии Устойчивого развития МЭА стоимость цемента в 2070 г. на 55% выше, чем в сценарии Заявленной политики, и на 60% выше цены базового года (IEA, 2020).

Ценовая конкуренция строительных материалов в долгосрочных прогнозах практически не учитывается. Однако она может стать важным фактором, определяющим перспективный спрос на бетон и цемент. Цены на многие другие строительные материалы – сталь, алюминий, пластики – также будут расти за счет углеродного регулирования. Это позволит сделать альтернативы с применением строительной древесины более экономически привлекательными.

Список литературы

Башмаков, И.А. (2021) Выбросы парниковых газов от мировой черной металлургии: прошлое, настоящее и будущее, *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*, т. 77, № 8, с. 882-901.

Башмаков И.А. (2022) Углеродное регулирование в ЕС и российский сырьевой экспорт, *Вопросы экономики*, № 1, с. 90-109, электронный ресурс, URL: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-90-109>.

Andrew, R.M. (2019) Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, pp. 1675-1710.

Bataille, C. (2020) *Low and zero emissions in the steel and cement industries: barriers, technologies and policies, OECD Green Growth Papers*, OECD 2020/02, OECD Publishing.

Bashmakov et al. (2022) *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)*, in Skea, J. et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

BEE (2018) *Improving Energy Efficiency in Cement Sector (Achievements and Way Forward)*, Bureau of Energy Efficiency (BEE), Ministry of Power, Govt. of India, and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, New Delhi, September 2018.

Bleischwitz, R., Nechifor, V., Winning, M., Huang, B., Geng, Y. (2018) Extrapolation or saturation – Revisiting growth patterns, development stages and decoupling, *Glob. Environ. Chang.*, vol. 48, pp. 86-96, available at: <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2017.11.008>.

Cai B., Wang, J., He, J., Geng, Yong (2016) Evaluating CO₂ emission performance in China's cement industry: An enterprise perspective, *Applied Energy*, vol. 166, pp. 191-200, available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.006>.

Cao, Z., Shen, L., Løvik, A.N., Müller, D.B., Liu, G. (2017) Elaborating the History of Our Cementing Societies: An in-Use Stock Perspective, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51(19), pp. 11468-11475, doi:10.1021/acs.est.7b03077.

Cao, Z. et al. (2020) The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), p. 3777, doi:10.1038/s41467-020-17583-w.

CEMBUREAU (2020) *Cementing the European Green Deal*, 07 p., available at: https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf.

Chen, C. et al. (2022) A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries, *Environ. Res. Lett.*, vol. 17, 044007, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac48b5>.

Climate Action Tracker (2020) *Paris Agreement Compatible Sectoral Benchmark*, 67 p., available at: https://climateactiontracker.org/documents/753/CAT_2020-07.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent. [Dataset]*, doi:<http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>.

GCCA (2021a) *GNR – GCCA in Numbers*, available at: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>, accessed August 27, 2021.

Hertwich, E.G. et al. (2019) Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics – A review, *Environ. Res. Lett.*, vol. 14(4), 043004, doi:10.1088/1748-9326/ab0fe3.

EC (2021) *COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT, Towards competitive and clean European steel*, Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Updating the 2020 New Industrial Strategy: Building a stronger Single Market for Europe's recovery {COM(2021) 350 final} - {SWD(2021) 351 final} - {SWD(2021) 352 final}.

ECRA (European Cement Research Academy) and Cement Sustainability Initiative (CSI) (2017), *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*, ECRA, Düsseldorf and Geneva, available at: www.wbcscement.org/technology.

GCCA (2021a) *GNR – GCCA in Numbers*, available at: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>, accessed August 27, 2021.

GCCA (2021b) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 p., available at: <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Documents-AW.pdf>.

Guo, R. et al. (2021) Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13(4), pp. 1791-1805, doi:10.5194/essd-13-1791-2021.

IEA (2018) *Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, Paris, available at: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>, Cement – Analysis - IEA.

IEA (2019) *Material efficiency in clean energy transitions*, OECD, Paris, France, 158 p., available at: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>.

IEA (2020a) *Energy Technology Perspective 2020*, Paris, 397 p.

IEA (2020b) *Tracking industry 2020*, available at: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>, accessed December 20, 2020.

IEA (2021a) *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*. IEA, 2019, *Material efficiency in clean energy transitions*, OECD, Paris, France, 158 p., available at: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>.

IEA (2021b) *World energy balances*, available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>, accessed October 29, 2020.

IEA (2021c) *Iron and Steel. Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking*.

IEA (2021d) *CO₂ Emissions from Fuel Combustion online data service*, available at: data.iea.org/payment/products/115-co2-emissions-from-fuel-combustion-2021-edition.aspx, accessed August 27, 2020.

IFC (2017) *Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: international best practice*, International Finance Corporation, available at: <https://doi.org/10.1596/28304>.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Edenhofer, O. et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge.

IRP (2020) *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*, in Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. (eds.), A report of the International Resource Panel, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., Wiedenhofer, D. (2018) From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015, *Glob. Environ. Chang.*, vol. 52, pp. 131-140, doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003.

Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A.A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M.J., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S.K., Khennas, S., de la Rue du Can, S., Chapungu, L., Davis, S.J., Bashmakov, I., Dai, H., Dhakal, S., Tan, X., Geng, Y., Gu, B., Minx, J.C. (2021) A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018, *Environmental Research Letters*, vol. 16(7), 073005, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.

Liao, S., Wang, D., Xia, C. et al. (2022) China's provincial process CO₂ emissions from cement production during 1993-2019, *Sci Data*, vol. 9, p. 165, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01270-0>.

Material Economics (2019) *Industrial Transformation 2050: Pathways to net-zero emissions from EU Heavy Industry*, available at: <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>.

Minx, J.C. et al. (2021) Gas Emissions By Sector 1970-2019, *Earth Syst. Sci. Data*, (July), pp. 1-63.

Mishra U.C., Sarsaiya, S., Gupta, A. (2022) A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, pp. 18440-18451, available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18672-7>.

Moya, J.A., Pardo, N., Mercier, A. (2010) *Energy Efficiency and CO₂ Emissions – Prospective Scenarios for the Cement Industry*, EUR 24592 EN, Joint

Research Centre, Institute for Energy, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 83 p., doi:10.2790/25732.

Sanjuan, Miguel Angel, Pedro, Mora (2020) Carbon Dioxide Uptake by Cement-Based Materials: A Spanish Case Study, *Appl. Sci.*, vol. 10, p. 339, doi:10.3390/app10010339.

SINTEF Energi AS (2015) *Design and performance of CEMCAP cement plant with MEA post combustion capture, Revision 1*, Project co-funded by the European Commission within Horizon 2020.

Stripple, H., Ljungkrantz, C., Gustafsson, T., Andersson, R. (2018) *CO₂ uptake in cement-containing products. Background and calculation models for IPCC implementation*, 66 p.

UKCCC (2019b) *Net Zero Technical Report*, London, UK, 302 p., available at: <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>.

U.S. (2017) *Cement Manufacturing*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, September 2017.

US DOE (2017) *Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Savings Opportunities in U.S. Advanced High Strength Steels Manufacturing*.

USGS (2021) *Mineral commodity summaries 2021*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Wiedenhofer, D., Fishman, T., Lauk, C., Haas, W., Krausmann, F. (2019) Integrating Material Stock Dynamics Into Economy-Wide Material Flow Accounting: Concepts, Modelling, and Global Application for 1900-2050, *Ecol. Econ.*, vol. 156, pp. 121-133, doi:10.1016/j.ecolecon.2018.09.010.

Worrell E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Ozawa Meida, L. (2001) Carbon Dioxide Emissions From The Global Cement Industry, *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 26, pp.303-329.

Worrell, E., Kermeli, K., Galitsky, C. (2013) *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making*, EPA.

Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y., Liu, Z. (2016) Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, 880-883, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

References

Bashmakov, I.A. (2021) Vybrosov parnikovykh gazov ot mirovoy chernoy metallurgii: proshloye, nastoyashcheye i budushcheye [Greenhouse Gas Emissions from the Global Ferrous Metallurgy: Past, Present and Future], *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*, vol. 77, no. 8, pp. 882-901.

Bashmakov I.A. (2022) Uglernodnoye regulirovaniye v YES i rossiyskiy syr'yevoy eksport [Carbon regulation in the EU and Russian commodity exports], *Voprosy ekonomiki*, no. 1, pp. 90-109, available at: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-90-109>.

Andrew, R.M. (2019) Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, pp. 1675-1710.

Bataille, C. (2020) *Low and zero emissions in the steel and cement industries: barriers, technologies and policies*, *OECD Green Growth Papers*, OECD 2020/02, OECD Publishing.

Bashmakov et al. (2022) *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)*, in Skea, J. et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

BEE (2018) *Improving Energy Efficiency in Cement Sector (Achievements and Way Forward)*, Bureau of Energy Efficiency (BEE), Ministry of Power, Govt. of India, and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, New Delhi, September 2018.

Bleischwitz, R., Nechifor, V., Winning, M., Huang, B., Geng, Y. (2018) Extrapolation or saturation – Revisiting growth patterns, development stages and decoupling, *Glob. Environ. Chang.*, vol. 48, pp. 86-96, available at: <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2017.11.008>.

Cai B., Wang, J., He, J., Geng, Yong (2016) Evaluating CO₂ emission performance in China's cement industry: An enterprise perspective, *Applied Energy*, vol. 166, pp. 191-200, available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.006>.

Cao, Z., Shen, L., Løvik, A.N., Müller, D.B., Liu, G. (2017) Elaborating the History of Our Cementing Societies: An in-Use Stock Perspective, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51(19), pp. 11468-11475, doi:10.1021/acs.est.7b03077.

Cao, Z. et al. (2020) The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), p. 3777, doi:10.1038/s41467-020-17583-w.

CEMBUREAU (2020) *Cementing the European Green Deal*, 07 p., available at: https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf.

Chen, C. et al. (2022) A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries, *Environ. Res. Lett.*, vol. 17, 044007, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac48b5>.

Climate Action Tracker (2020) *Paris Agreement Compatible Sectoral Benchmark*, 67 p., available at: https://climateactiontracker.org/documents/753/CAT_2020-07.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent. [Dataset]*, doi:<http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>.

GCCA (2021a) *GNR – GCCA in Numbers*, available at: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>, accessed August 27, 2021.

Hertwich, E.G. et al. (2019) Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics – A review, *Environ. Res. Lett.*, vol. 14(4), 043004, doi:10.1088/1748-9326/ab0fe3.

EC (2021) *COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT*, Towards competitive and clean European steel. Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Updating the 2020 New Industrial Strategy: Building a stronger Single Market for Europe's recovery {COM(2021) 350 final} - {SWD(2021) 351 final} - {SWD(2021) 352 final}.

ECRA (European Cement Research Academy) and Cement Sustainability Initiative (CSI) (2017), *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*, ECRA, Düsseldorf and Geneva, available at: www.wbcscement.org/technology.

GCCA (2021a) *GNR – GCCA in Numbers*, available at: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>, accessed August 27, 2021.

GCCA (2021b) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 p., available at: <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Documents-AW.pdf>.

Guo, R. et al. (2021) Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13(4), pp. 1791-1805, doi:10.5194/essd-13-1791-2021.

IEA (2018) *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, Paris, available at: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>, Cement – Analysis - IEA.

IEA (2019) *Material efficiency in clean energy transitions*, OECD, Paris, France, 158 p., available at: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>.

IEA (2020a) *Energy Technology Perspective 2020*, Paris, 397 p.

IEA (2020b) *Tracking industry 2020*, available at: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2020>, accessed December 20, 2020.

IEA (2021a) *Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector*. IEA, 2019, *Material efficiency in clean energy transitions*, OECD, Paris, France, 158 p., available at: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>.

IEA (2021b) *World energy balances*, available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>, accessed October 29, 2020.

IEA (2021c) *Iron and Steel. Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking*.

IEA (2021d) *CO₂ Emissions from Fuel Combustion online data service*, available at: data.iea.org/payment/products/115-co2-emissions-from-fuel-combustion-2021-edition.aspx, accessed August 27, 2020.

IFC (2017) *Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: international best practice*, International Finance Corporation, available at: <https://doi.org/10.1596/28304>.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Edenhofer, O. et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge.

IRP (2020) *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*, in Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. (eds.), A report of the International Resource Panel, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., Wiedenhofer, D. (2018) From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015, *Glob. Environ. Chang.*, vol. 52, pp. 131-140, doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003.

Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A.A., House, J., Pachauri, S., Figuerola, M.J., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S.K., Khennas, S., de la Rue du Can, S., Chapungu, L., Davis, S.J., Bashmakov, I., Dai, H., Dhakal, S., Tan, X., Geng, Y., Gu, B., Minx, J.C. (2021) A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018, *Environmental Research Letters*, vol. 16(7), 073005, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.

Liao, S., Wang, D., Xia, C. et al. (2022) China's provincial process CO₂ emissions from cement production during 1993-2019, *Sci Data*, vol. 9, p. 165, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01270-0>.

Material Economics (2019) *Industrial Transformation 2050: Pathways to net-zero emissions from EU Heavy Industry*, available at: <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>.

Minx, J.C. et al. (2021) Gas Emissions By Sector 1970-2019, *Earth Syst. Sci. Data*, (July), pp. 1-63.

Mishra U.C., Sarsaiya, S., Gupta, A. (2022) A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, pp. 18440-18451, available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18672-7>.

Moya, J.A., Pardo, N., Mercier, A. (2010) *Energy Efficiency and CO₂ Emissions – Prospective Scenarios for the Cement Industry*, EUR 24592 EN, Joint Research Centre, Institute for Energy, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 83 p., doi:10.2790/25732.

Sanjuan, Miguel Angel, Pedro, Mora (2020) Carbon Dioxide Uptake by Cement-Based Materials: A Spanish Case Study, *Appl. Sci.*, vol. 10, p. 339, doi: 10.3390/app10010339.

SINTEF Energi AS (2015) *Design and performance of CEMCAP cement plant with MEA post combustion capture, Revision 1*, Project co-funded by the European Commission within Horizon 2020.

Stripple, H., Ljungkrantz, C., Gustafsson, T., Andersson, R. (2018) *CO₂ uptake in cement-containing products. Background and calculation models for IPCC implementation*, 66 p.

UKCCC (2019b) *Net Zero Technical Report*, London, UK, 302 p., available at: <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>.

U.S. (2017) *Cement Manufacturing*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, September 2017.

US DOE (2017) *Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Savings Opportunities in U.S. Advanced High Strength Steels Manufacturing*.

USGS (2021) *Mineral commodity summaries 2021*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Wiedenhofer, D., Fishman, T., Lauk, C., Haas, W., Krausmann, F. (2019) Integrating Material Stock Dynamics Into Economy-Wide Material Flow Accounting: Concepts, Modelling, and Global Application for 1900-2050, *Ecol. Econ.*, vol. 156, pp. 121-133, doi:10.1016/j.ecolecon.2018.09.010.

Worrell E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Ozawa Meida, L. (2001) Carbon Dioxide Emissions From The Global Cement Industry, *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 26, pp.303-329.

Worrell, E., Kermeli, K., Galitsky, C. (2013) *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making*, EPA.

Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y., Liu, Z. (2016) Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, 880-883, available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

Статья поступила в редакцию (Received): 07.11.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 30.11.2022.

Принята к публикации (Accepted): 24.02.2023.

Для цитирования / For citation:

Башмаков, И.А. (2023) Перспективы развития и декарбонизации цементной промышленности мира, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 1, с. 33-64, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-33-64.

Bashmakov, I.A. (2023) Global cement industry development and decarbonization perspectives, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 1, pp. 33-64, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-33-64.