

Перспективы декарбонизации цементной промышленности России

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 прогнозные оценки направлений декарбонизации российской цементной промышленности. Показано, что после 2000 г. пик выбросов парниковых газов пришелся на 2013 г. – 49 млн тCO₂, что на 20% ниже уровня 1990 г. К 2060 г. снижение выбросов ПГ в цементной промышленности России может составить 79% от уровня 1990 г. Превращение ее в углероднейтральную в 2060 г. возможно за счет увеличения масштабов применения технологии CCUS или доведения доли биомассы в топливном балансе до 80-90%. Однако, с учетом «эффекта губки» цементная промышленность России может стать углероднейтральной уже к 2040 г., а затем она становится нетто-стоком углерода.

Ключевые слова. Цементная промышленность, декарбонизация, прогнозы, парниковые газы, технологии.

Russian cement industry 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 considers possible directions of decarbonization of the Russian cement industry. It is shown that after 2000, the peak of greenhouse gas emissions occurred in 2013 at 49 million tCO₂, which is 20% below the 1990 level. By 2060, the reduction of GHG emissions in the Russian cement industry may reach 79% of the 1990 level. Its transformation into carbon neutral by 2060 is possible via increasing the scale of application of CCUS or bringing the share of biomass in the fuel balance up to 80-90%. However, taking into account the “sponge effect”, the cement industry in Russia may become carbon neutral even by 2040, and then it becomes a net sink (GHG) of carbon.

Keywords. Cement industry, decarbonization, projections, greenhouse gases, technologies.

Перспективы развития цементной промышленности в России до 2060 г.

Индекс работ в строительстве в большинстве стран и в России растет медленнее ВВП и медленнее индекса производства в обрабатывающей промышленности (ОЕСД, 2022). В России индекс работ в строительстве в 2021 г. был на 4% ниже уровня 2008 г. Во многих странах мира (например, в Японии, Бельгии, Ирландии, Греции) индекс работ в строительстве в 2021 г. был ниже даже уровней 1970-1995 гг. Таким образом, и российский опыт последних 13 лет, и опыт многих стран показывает, что рост индекса работ в строительстве может отставать от роста ВВП. Последствием наложенных на Россию санкций станет дальнейшее падение индекса работ в строительстве. В итоге, в нижней точке кризиса (2023 г.) по оценке автора он окажется на 17% ниже уровня 2021 г. и на 20% ниже уровня 2008 г. Санкционные ограничения на экспорт и импорт приведут к существенному снижению доходов как населения, так и бизнеса. Такое падение доходов наряду с высокими ставками процентов по кредиту и недоступностью западных кредитов значительно ограничит инвестиционную активность и приведет к глубокому падению объемов работ в строительстве (Bashmakov et al., 2022).

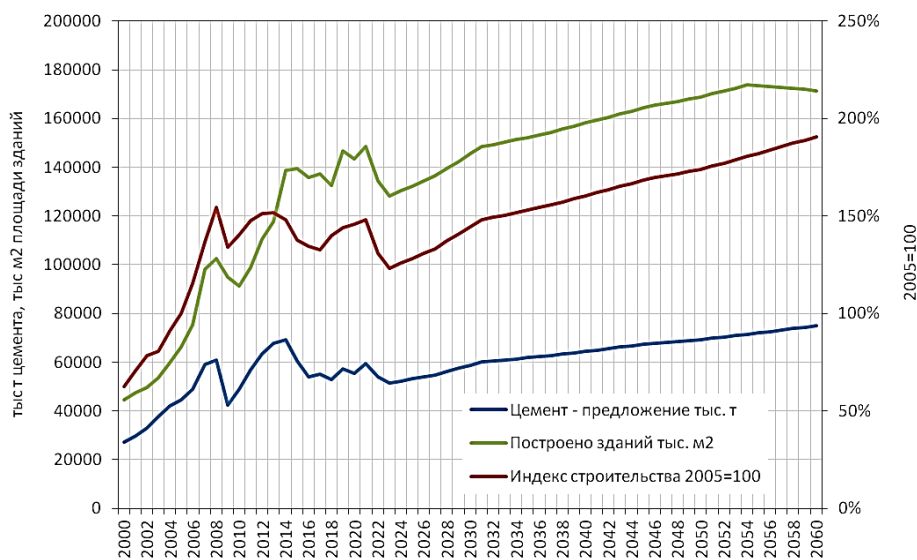
Как ожидается, на уровень 2021 г. индекс работ в строительстве выйдет не ранее 2031 г., а на уровень 2008 г. – не ранее 2036 г. Индекс работ в строительстве вырастет в 2021-2060 гг. только на 29%, или в среднем будет расти на 0.6% в год. Анализ показал, что Россия потеряет 10-11 лет экономического роста, а уровень ВВП 2021 г. вернется к 2031-2032 гг. К 2050 г. Россия потеряет около 50% от ранее ожидаемого потенциального роста ВВП. В 2060 г. ВВП России будет только на 21-44% выше, чем в 2021 г., а темпы роста ВВП не превысят 1.6% в 2040-2050 гг. и 1.3% в 2050-2060 гг. Неспособность обеспечить новые институциональные и социально-политические рамки для стимулирования экономического роста с «опорой на собственные силы» ограничит рост ВВП России в 2021-2060 гг. лишь уровнем 6-22% (Bashmakov et al., 2022).

Площадь построенных зданий, согласно данным Росстата, вышла на пик 148 млн м² в 2021 г. Она вернется к этому уровню только к 2031 г. В связи с падением доходов, удорожанием кредитов и ипотеки объемы построенных в 2022-2030 гг. зданий заметно снизятся. Затем – при благоприятных институциональных и экономических условиях – они начнут расти. В расчетах предполагается, что максимальный ввод жилых зданий на 1 чел. в год не превысит 1 м², а всех зданий – 1.3 м². Поэтому после выхода в 2050-е годы на этот уровень объемы строительства зданий достигают пика и начинают снижаться вслед за снижением численности населения. Обеспеченность площадью зданий к 2060 г. достигает 82.5 м²/чел. при нынешнем уровне в США 100 м²/чел., а в Европе – 64 м²/чел.

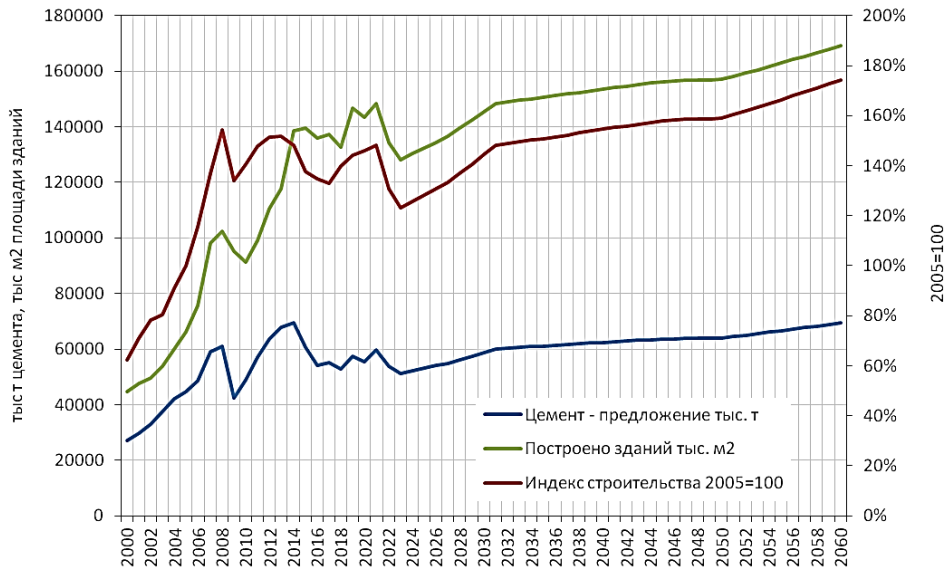
Потребление цемента сначала падает до 51 млн т к 2023 г., а затем растет, но не будет превышать 75 млн т к 2060 г. в сценарии «Возвращение в

мировую экономику». В сценарии «Опора на собственные силы» с умеренным прогрессом в повышении продуктивности экономики России потребление цемента выходит к 2060 г. на уровень немногим ниже 70 млн т. В расчете на душу населения оно повышается до 560 кг к 2060 г. в первом сценарии (рис. 1). Это заметно выше уровня, на котором, по оценке МЭА, ожидается конвергенция удельного потребления цемента в мире (485 кг/чел.), и на верхней границе удельного потребления цемента, соответствующего уровню ВВП на душу населения в диапазоне 40-45 тыс. долл. 2017 г. по ППС в год (см. рис. 2). В сценарии «Опора на собственные силы» удельное потребление цемента к 2060 г. растет до 500 кг/чел. Это ближе к значениям для стран, которые сегодня имеют ожидаемый для России на 2060 г. уровень ВВП на душу населения. Для такого уровня характерна стабилизация или снижение удельного расхода цемента на душу населения. Поэтому можно ожидать, что потребление цемента будет находиться в диапазоне 70-75 млн т вплоть до 2060 г., а с учетом возможного повышения эффективности использования бетона и цемента уровень потребления может быть и ниже. Это заметно меньше контрольных цифр принятой в 2020 г. «Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» – 90 млн т на 2035 г.

Объемы производства цемента в России будут следовать за динамикой его потребления. Объемы импорта и экспорта цемента невелики. География внешней торговли цементом в основном охватывает страны, которые не вводили санкций. Кризис, в т.ч. из-за логистики, скажется и на внешней торговле цементом, но поскольку чистый импорт цемента в последние годы заметно не превышал 0.5 млн т, т.е. менее 1% от всего производства цемента, то его изменение мало скажется на динамике производства.



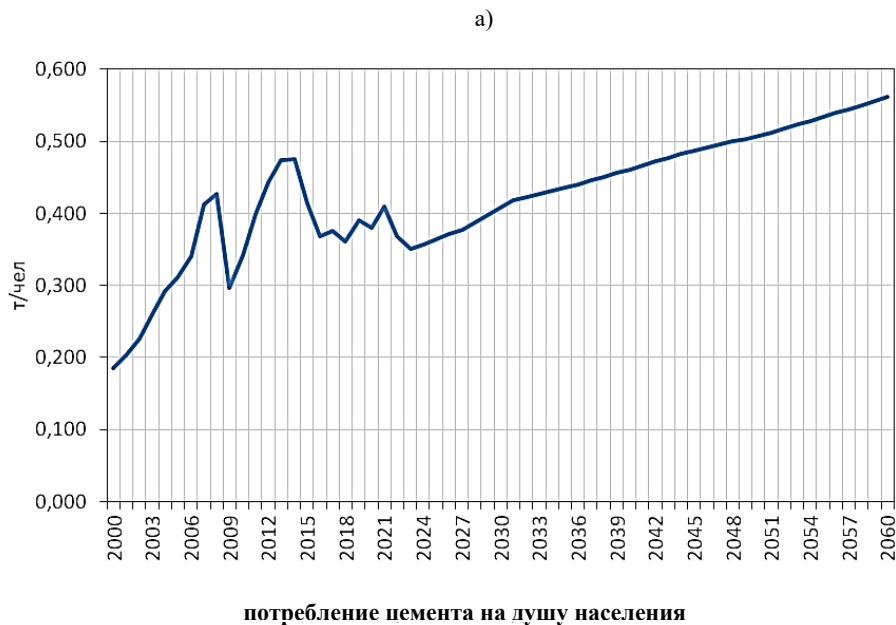
а) сценарий «Возвращение в мировую экономику» с динамичным развитием нефтегазового ВВП после 2031 г. на основе повышения производительности всех факторов производства»

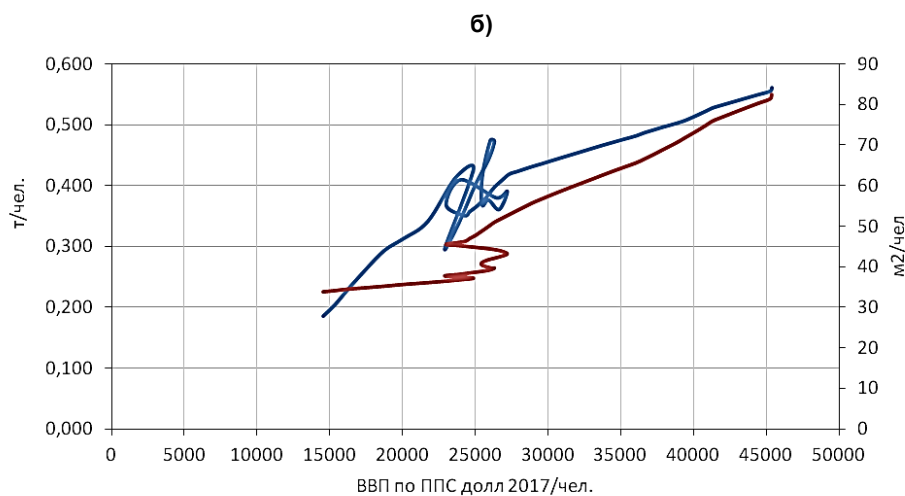


б) сценарий «Опора на собственные силы» с более медленным развитием нефтегазового ВВП»

Рисунок 1. Индекс работ в строительстве, площадь построенных зданий и потребление цемента в России в 2000-2060 гг. (оценки на базе: Bashmakov et al., 2022)

Figure 1. Index construction activity, flow space of constructed buildings and cement consumption in Russia in 2000-2060 (estimated based on: Bashmakov et al., 2022)





**потребление цемента на душу населения и обеспеченность площадью зданий
в зависимости от ВВП на душу населения**

Рисунок 2. Потребление цемента и обеспеченность площадью зданий на душу населения
(оценки автора)

Figure 2. Consumption of cement and provision of building space per capita (author's estimates)

Объемы производства цемента в России будут следовать за динамикой его потребления. Объемы импорта и экспорта цемента невелики. География внешней торговли цементом в основном охватывает страны, которые не вводили санкций. Кризис, в т.ч. из-за логистики, скажется и на внешней торговле цементом, но поскольку чистый импорт цемента в последние годы заметно не превышал 0.5 млн т, т.е. менее 1% от всего производства цемента, то его изменение мало скажется на динамике производства.

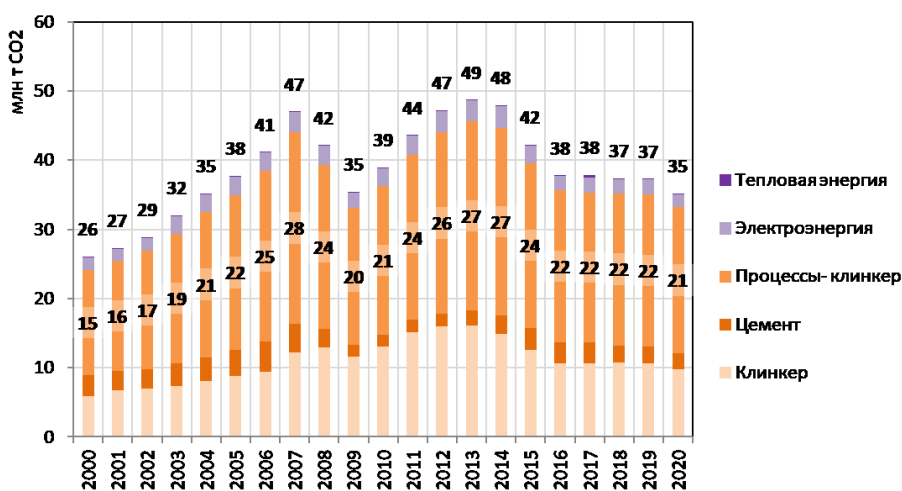
Объемы производства клинкера будут сокращаться: резко в 2022-2023 гг. (до 35 млн т) с последующим частичным восстановлением до 38 млн т к 2031 г. и затем со стабилизацией на уровне 36-38 млн т вплоть до 2060 г. В расчетах предполагается постепенное снижение доли клинкера в цементе (измеренное по данным статистики Росстата) с 72% в 2021 г. до 50% (лучшие сегодняшние практики) к 2053 г. с последующей стабилизацией на этом уровне до 2060 г.

Из-за кризиса процессы модернизации цементной промышленности могут заметно растянуться во времени. Оборудование для цементных заводов импортируется в основном из стран, которые ввели санкции. Альтернативы существуют в Китае и других странах. Их способность заменить поставщиков из развитых стран требует специального изучения.

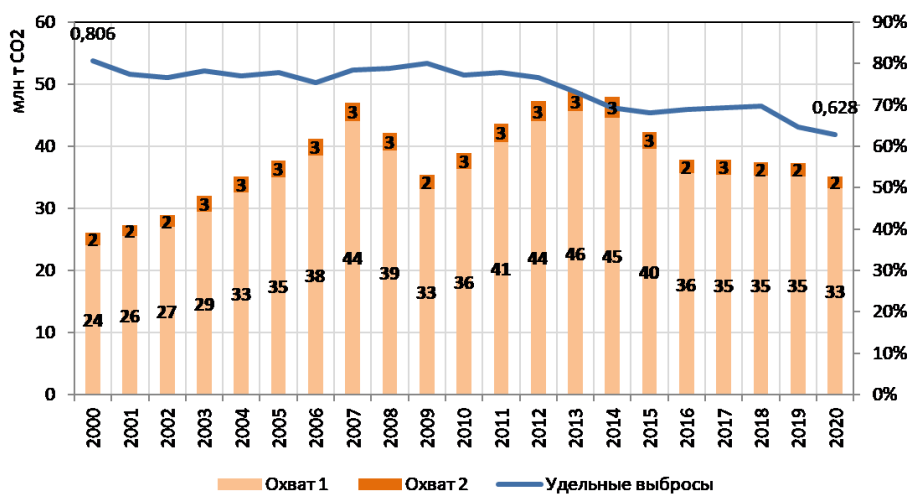
Ретроспективная динамика выбросов парниковых газов от цементной промышленности

По оценке автора выбросы ПГ от производства цемента в России по охватам 1+2 в 2019 г. составили 37 млн тСО₂, а в 2020 г. – 35 млн тСО₂ (рис.

3), или только 1.2% от всех выбросов мировой цементной промышленностью (Bashmakov et al., 2022). Выбросы от сжигания топлива при производстве цемента составили соответственно 13 и 12 млн тCO₂; от промышленных процессов – еще 22 и 21 млн тCO₂, а от используемой в отрасли электрической и тепловой энергии – еще 2 млн тCO₂. По данным национальной инвентаризации, выбросы от технологических процессов составили 20.3 млн тCO₂. (Национальный доклад, 2022). Используемый в ней уровень производства клинкера дан по форме «1-натура». Однако в форме «4-ТЭР» даются более высокие объемы производства клинкера.



а) выбросы по источникам



б) выбросы по охватам 1 и 2

Рисунок 3. Динамика выбросов ПГ от цементной промышленности России в 2000-2020 гг. (оценки автора по данным Росстата)

Figure 3. Dynamics of GHG emissions from the Russian cement industry in 2000-2020 (author's estimates based on Rosstat)

В среднем по России удельные выбросы при производстве 1 т цемента по охвату 1 в 2020 г. оценены равными 594 кгСО₂/т цемента, по охватам 1+2 – 628 кгСО₂/т цемента, по охвату 1 – 771 кгСО₂/т клинкера. Все эти значения ниже среднемировых показателей. Приведенные оценки получены как результат деления данных по суммарным выбросам СО₂ на объемы производства цемента и клинкера. В структуре выбросов ПГ при производстве цемента доминируют прямые выбросы (охват 1) – 94-95%, а в прямых выбросах доминируют технологические выбросы – 62-64%.

Снижение выбросов ПГ от российской цементной промышленности в 1990-2019 гг. можно оценить равным 43%. По данным национальной инвентаризации выбросы от технологических процессов в 1990 г. составили 34.6 млн тСО₂ (Национальный доклад, 2022). Выбросы от сжигания топлива с учетом его более высоких удельных расходов в 1990 г. и меньшей доли природного газа составляли около 43% суммарных выбросов, которые в этом случае можно оценить равными 61 млн тСО₂.

После 2000 г. пик выбросов – 49 млн тСО₂ – был достигнут в 2013 г. Динамика выбросов следовала за динамикой производства цемента с коррекцией на снижение удельных выбросов. По охватам 1+2 выбросы ПГ от производства цемента в 2000-2021 гг. выросли в 1.35 раза, а в 2000-2019 – в 1.43 раза (рост на 1.9% в год). Удельные выбросы в 2000-2020 гг. снизились на 22%, с 806 до 628 кгСО₂/т цемента. Это произошло за счет снижения клинкер-фактора и сокращения удельного расхода топлива из-за роста доли производства цемента сухим способом.

В России еще нет системы учета удельных выбросов парниковых газов по видам продукции (цемент, клинкер), и только в 2022 г. силами ЦЭНЭФ-ХХI для ЦЭПП была создана национальная система бенчмаркинга по удельным выбросам ПГ для цементных заводов – программный комплекс «Оценка углеродоемкости (бенчмаркинг) продукции цементной промышленности Российской Федерации». ЦЭПП только приступил к ее эксплуатации. Приведенные значения абсолютных и удельных выбросов парниковых газов для цементной промышленности России – это оценки автора.

Перспективная динамика выбросов парниковых газов от цементной промышленности¹⁾

В отличие от многих стран (Китай, Индия), в России с ее более возрастными мощностями по производству цемента есть существенный потенциал повышения энергоэффективности, реализация которого позволяет заметно снизить выбросы ПГ от процессов сжигания топлива. Постепенное прибли-

¹⁾Методика прогнозных расчетов и их основные результаты по всем секторам экономики показаны в (Bashmakov et al., 2022). Расчеты проведены на имитационной инженерно-экономической модели для промышленности INDEE-MOD, в которой выделен блок цементной промышленности.

жение удельных расходов энергии к уровням практического минимума (лучшим нынешним показателям для цементных заводов мира) и к характеристикам термодинамического минимума в районе 2045-2050 гг. позволяет существенно снизить потребность российской цементной промышленности в ископаемом топливе даже при росте уровня производства цемента к 2060 г. Этому также способствует рост доли прочих видов топлива, и в первую очередь, биомассы при производстве клинкера. По мере исчерпания потенциала экономии энергии снижение выбросов от сжигания топлива замедляется после 2045 г.

Снижение выбросов от технологических процессов ограничено. Оно происходит в основном за счет замены клинкера в цементах на менее углеродоемкие материалы (рис. 4 и 5). Отношение клинкер/цемент снижается до 50% к 2053 г. и затем стабилизируется на этом уровне до 2060 г. При росте производства цемента после 2030 г. это приводит к практической стабилизации выбросов от промышленных процессов вплоть до 2060 г.

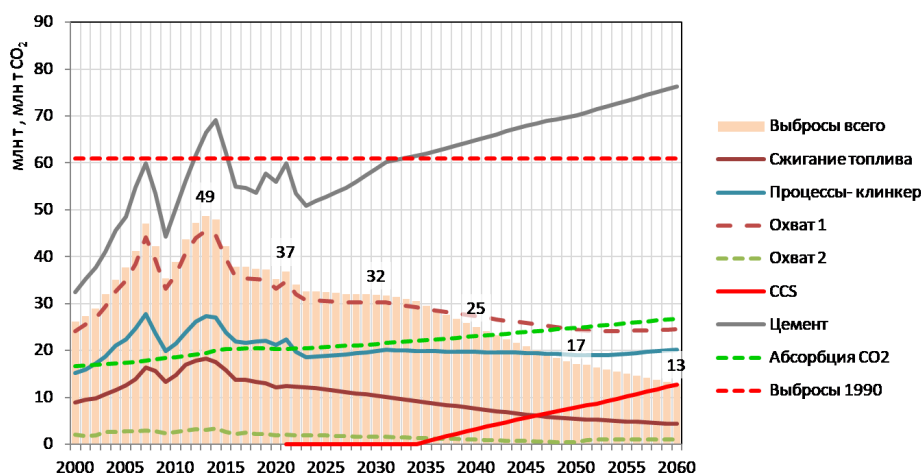


Рисунок 4. Динамика выбросов и стоков ПГ в цементной промышленности России в 2000-2060 гг. (оценки автора)

Figure 4. Dynamics of GHG emissions and sinks in the Russian cement industry in 2000-2060 (author's estimates)

Повышение энергоэффективности, снижение клинкер-фактора и замещение ископаемого топлива могут обеспечить значительное снижение выбросов CO₂ в российской цементной промышленности. Для ее еще более глубокой декарбонизации необходимо наращивание масштабов использования технологии CCUS. Предполагается, что эта технология будет применяться в России с 2035 г., и к 2060 г. масштабы захвата и захоронения составят 12.7 млн тCO₂. Однако даже такой масштаб применения технологии CCUS не позволяет трансформировать российскую цементную промышленность в углеродонейтральную. В 2060 г. нетто-выбросы сохраняются на уровне 13 млн тCO₂, что равно 21% от значения 1990 г. Годовые инвестиции в техноло-

гию CCUS выходят на пик 114 млн долл. в 2035 г., а затем снижаются и в сумме за 2022-2060 гг. составляют 2.2 млрд. долл.

Снижение выбросов ПГ в цементной промышленности России в 1990-2060 гг. составляет 79%. Превращение ее в углероднейтральную в 2060 г. возможно за счет удвоения масштабов применения технологии CCUS или доведения доли биомассы в топливном балансе до 80-90%.

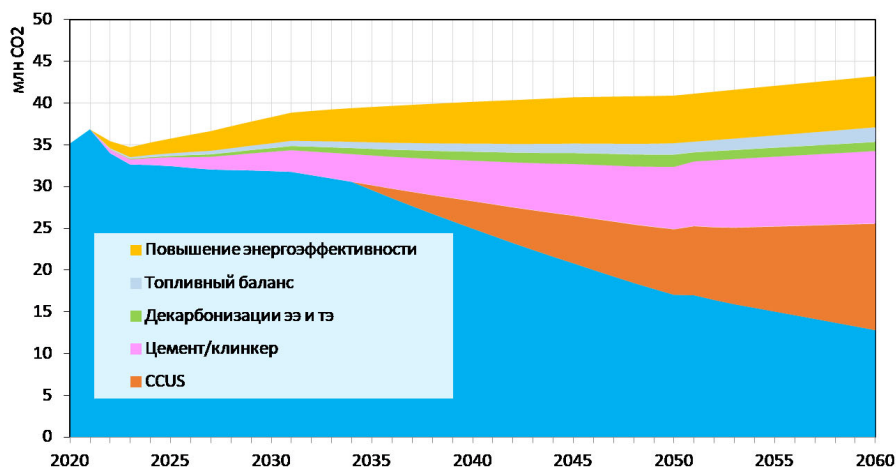


Рисунок 5. Вклад отдельных мер в снижение выбросов CO₂ от российской цементной промышленности (оценки автора)

Figure 5. Contribution of selected measures to reduce CO₂ emissions from the Russian cement industry (author's estimates)

С учетом «эффекта губки» (Cao et al., 2020; Guo et al., 2021; GCCA, 2021; Xi et al., 2016) цементная промышленность России может стать углероднейтральной к 2040 г., а затем она становится нетто-стоком углерода (рис. 6). Если этот сток будет учитываться в национальной инвентаризации, то для достижения углеродной нейтральности использование CCUS не понадобится. Для Испании такая работы уже начата (см. Sanjuan et al., 2020). Можно оценить масштаб поглощения бетоном CO₂ (повторная карбонизация) на территории России в размере 26.8 млн тCO₂ в 2060 г. Даже если эта величина в 2 раза меньше, то цементная промышленность России может стать углероднейтральной к 2060 г. Специальные исследования по абсорбции цементосодержащими продуктами CO₂ на территории России не проводились. Приведенная оценка получена на основе допущения о том, что средний запас цемента на душу населения в России такой же, как он оценен в Cao et al. (2020) для стран СНГ за 2000-2020 гг. и по данным (Guo et al., 2021). Затем он оценивался на основе прогноза по ежегодному потреблению цемента и при допущении, что ежегодно за счет сноса выбывает 1.5% запаса цемента. На базе работы Cao et al. (2020) было принято допущение, что ежегодно бетонная «губка» впитывает 0.008 тCO₂/т накопленного запаса цемента. Это позволило получить оценку стока CO₂ в бетонную «губку» в размере 26.8 млн тCO₂ в

2060 г. Эффект «губки» пока не учитывается в национальных инвентаризациях, но есть предложения по его учету при оценке источников и стоков выбросов ПГ.

Удельные выбросы в 2020-2060 гг. снижаются с 628 до 168 кгCO₂/т цемента. Для более существенного их снижения необходимо либо увеличить масштабы применения технологии CCUS, либо существенно изменить структуру топливного баланса отрасли в пользу биомассы с доведением ее доли до 80-90%, как это планируется в ЕС, либо учитывать эффект повторной карбонизации. При выходе на долю биомассы 80-90% удельные выбросы на 1 т цемента в России сокращаются до нуля к 2060 г.

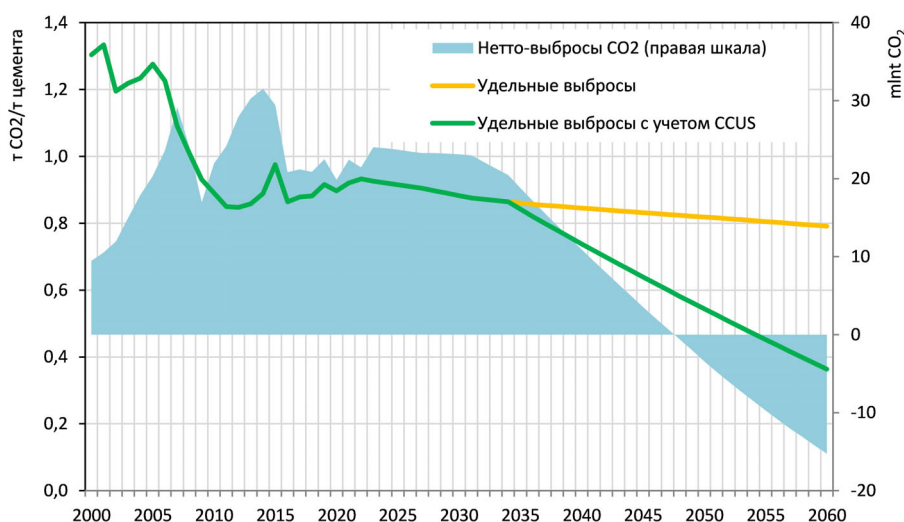


Рисунок 6. Динамика удельных выбросов CO₂ на тонну цемента и нетто-выбросов с учетом эффекта повторной карбонизации (правая шкала) в России в 2000-2060 гг. (оценки автора)

Figure 6. Dynamics of specific CO₂ emissions per ton of cement and net emissions, taking into account the effect of re-carbonization (right scale) in Russia in 2000-2060 (author's estimates)

Использование технологий декарбонизации цементной промышленности ведет к удорожанию цемента (Bashmakov et al., 2022b). Цемент с заводов, оснащенных CCUS, становится конкурентоспособным в 2043 г. при цене углерода 38 долл./тCO₂ и цене цемента 83 долл./т (рис. 7). При использовании в России технологии CCUS стоимость цемента сначала практически удваивается. Затем за счет масштабирования ее применения она постепенно сокращается. Чтобы сделать «низкоуглеродный цемент» конкурентоспособным, в первые годы нужны субсидии. При введении цены на углерод максимальный размер субсидий достигает 8 долл./т цемента в 2036 г. Затем, по мере удешевления технологии CCUS и повышения цены на углерод, субсидии снижаются до нуля к 2043 г. Всего сумма субсидий в 2036-2043 гг. составляет 60 млн долл.

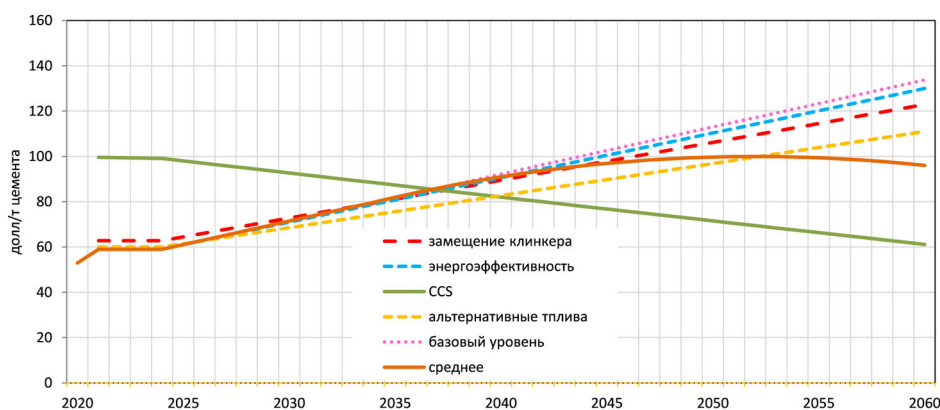


Рисунок 7. Приведенная стоимость производства цемента при введении цены на углерод с 2025 г. с ее монотонным повышением до 72 долл./тCO₂ к 2060 г.
(расчеты автора по данным Bataille et al. 2022)

Figure 7. Levelized costs of cement production with introduction of carbon price from 2025 with its monotonous increase to \$72/tCO₂ by 2060
(author's calculations based on Bataille et al. 2022)

При использовании технологий повышения энергоэффективности, использовании альтернативных топлив или заменителей клинкера цены на цемент не растут или растут очень незначительно. Однако при введении налога на углерод после реализации этих мер стоимость цемента будет расти, поскольку сохраняется значительная величина технологических выбросов. Но она будет ниже базового варианта. В итоге средние цены цемента выходят на пик 89 долл./т, который на 30 долл./т выше уровня 2021 г., а затем начинают медленно снижаться.

Список литературы

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2020 гг. (2022) Москва.

Bashmakov, I.V., Bashmakov, K., Borisov, M., Dzedzichuk, A., Lunin, Govor, I. (2022) *Russia's carbon neutrality: pathways to 2060*, CENef-XXI, М. (<https://cenef-xxi.ru/articles/russia-s-carbon-neutrality:-pathways-to-2060>).

Bashmakov et al. (2022b) Industry. In: *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.

Bataille, C., Åhman, M., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Neuhoff, K., Nilsson, L.J., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Steibert, S., Rahbar, S., Waisman, H., Sartor, O. (2022) *The Global Heavy Industry Decarbonization Technology Database Project*.

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.

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.

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

OECD (2022) *Industrial production (indicator)*, doi: 10.1787/39121c55-en (Accessed on 28 April 2022), Industry, Industrial production, OECD Data.

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.

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. Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, pp. 880-883, <https://doi.org/10.1038/ngo2840>.

References

Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom, za 1990-2020 gg. [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990-2020] (2022) Moscow, Russia.

Bashmakov, I.V., Bashmakov, K., Borisov, M., Dzedzichuk, A., Lunin and I. Govor (2022) *Russia's carbon neutrality: pathways to 2060*, CENef-XXI, M. (<https://cenef-xxi.ru/articles/russia-s-carbon-neutrality:-pathways-to-2060>).

Bashmakov et al. (2022b) Industry. In: *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.

Bataille, C., Åhman, M., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Neuhoff, K., Nilsson L.J., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Steibert, S., Rahbar, S., Waisman, H., Sartor, O. (2022) *The Global Heavy Industry Decarbonization Technology Database Project*.

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.

GCCA (2021) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 pp. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-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.

OECD (2022) *Industrial production (indicator)*, doi: 10.1787/39121c55-en (Accessed on 28 April 2022), Industry, Industrialproduction, OECD Data.

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.

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. Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, pp. 880-883, <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

Статья поступила в редакцию (Received): 03.11.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 16.05.2023.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Башмаков, И.А. (2023) Перспективы декарбонизации цементной промышленности мира, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 2, с. 165-177, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-165-177.

Bashmakov, I.A. (2023) Russian cement industry decarbonization perspectives, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 2, pp. 165-177, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-165-177.