

**Казанский Федеральный Университет**

**Кафедра технологии нефти газа и углеродных материалов<sup>1</sup>**

**Kazan Federal University,**

**Department of Oil gas and carbon materials technology**

**Диоксид углерода CO<sub>2</sub> в изменении климата и некоторые методы анализа**

**Carbon dioxide CO<sub>2</sub> in climate change and some methods of analysis**

**Рейналдо Тоскано Гаспарини, Reynaldo Toscano Gasparini<sup>a</sup>**

**Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich<sup>b</sup>**

**Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich<sup>c</sup>**

магистрант кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов<sup>a</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии нефти, газа и углеродных материалов, член экспертного совета РГО, и.о. руководителя группы «Водородная и альтернативная,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии нефти, газа и углеродных материалов

Казань, Россия

kemalov@mail.ru, gasparini.rt@gmail.com

**Аннотация:** В настоящее время мы сталкиваемся с большой проблемой изменения климата, парниковые газы, выбрасываемые в атмосферу в результате антропогенного воздействия, являются одними из величайших ускорителей этого процесса, особенно CO<sub>2</sub>. Таким образом, в последние годы было проведено множество исследований, касающихся декарбонизации, сокращения выбросов парниковых газов, возобновляемых источников энергии. Правительства играют очень важную роль, они должны предлагать решения и обсуждать, чтобы иметь возможность смягчить эту проблему, и для этого есть анализы, которые помогают в этом процессе. Эта статья направлена на обзор литературы по данной теме, чтобы привлечь внимание научного сообщества к этим исследованиям.

**Ключевые слова:** диоксид углерода, декарбонизация, климат, методы анализа, парниковые газы, возобновляемые источники энергии.

**Abstract:** Nowadays we are facing a big problem, that of climate change, the greenhouse gases emitted anthropically into the atmosphere are one of the great accelerators of this process, especially CO<sub>2</sub>. Thus, many studies referring to decarbonization, reduction of greenhouse gases, and renewable energy sources, have been carried out in recent years. Governments have a very important part, they must propose solutions and debates in order to be able to mitigate this problem, and for that there are analyzes that help in this process. This article aims to review some literature based on the theme, to add the scientific community to these studies.

**Keywords:** carbon dioxide, decarbonization, climate, analysis methods, greenhouse gases, renewable energy sources.

### **Введение (Introduction)**

Резкое увеличение мирового населения, более высокие технологические разработки и рост покупательной способности привели к значительному росту производства и, следовательно, потребления [1]. Если рост населения и спрос на энергию продолжат расти, до 2050 года концентрация CO<sub>2</sub> увеличится вдвое больше, чем до промышленной революции [2].

Большая часть энергии, производимой сегодня, получена из ископаемого топлива, глобальное потепление усиливается из-за типов газов, выделяемых в результате деятельности человека [3, 4], в результате чего в атмосфере изучается накопление парниковых газов. Интерес мира к атмосферному потеплению, а также их влияние на природу растет, что становится предметом многих дискуссий [5].

Есть законопроект в России (№ 1116605-7) что создает экономику с низким уровнем выбросов углекислого газа (Подход к выполнению международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов, который также будет учитывать количество углекислого газа, абсорбированного в атмосферу [6], эти проекты чрезвычайно важны для устойчивого развития стран.

Возобновляемые источники энергии заменяют традиционные источники энергии, но многие из них являются непостоянными, то есть зависят от факторов окружающей среды.

## **Парниковые газы: двуокись углерода**

Парниковые газы, таких как диоксид углерода, метан, оксиды азота связаны с резкими климатическими изменениями на нашей планете, в результате чего жара не может покинуть земной шар, вызывая колебания температуры во всех регионах [6, 7, 8].

CO<sub>2</sub>, один из основных парниковых газов, связан со сжиганием ископаемого топлива (углерода, нефти, газа), которое в основном используется для получения энергии и транспорта [2, 10]. CO<sub>2</sub> является основной проблемой из-за большого количества выбросов из антропологических и природных источников, на которые приходится примерно 82% общих выбросов парниковых газов [11].

В 2019 году доля Российской Федерации в мировых выбросах парниковых газов составила около 4,9%, а в глобальных выбросах CO<sub>2</sub> - около 4,7%. Общие выбросы парниковых газов состояли из 70,5% выбросов CO<sub>2</sub> и 20,5% не CO<sub>2</sub>, газов: 18,9% CH<sub>4</sub>, 3,2% N<sub>2</sub>O и 7,4% F-газа (Фторированные газы) [12].

В последние годы было проведено большое количество исследований, связывающих выбросы CO<sub>2</sub> с технологическим прогрессом, и при этом можно выделить некоторые моменты, большинство этих исследований проводится на уровне страны, поэтому сравнение выбросов и технологического развития все еще не проводится разъяснение в разных секторах, поскольку каждый сектор имеет разные технологические уровни и уровни выбросов газа, необходимо проанализировать каждый с его отдельными переменными. Другой момент заключается в том, что нет единого мнения о влиянии технологического развития на выбросы парниковых газов, возможно, из-за отсутствия секторных исследований [13, 14, 15, 16, 17].

## **Действия правительства против выбросов парниковых газов**

Политики в нескольких развитых и развивающихся странах полны решимости найти наилучшие решения для сокращения выбросов углерода в ближайшие годы, поскольку спрос на энергию имеет тенденцию к росту, а есть трудности с поиском решений без наложения большого экономического

бремени, поскольку это бремя можно рассматривать как политический предлог [18].

Амбициозной количественной целью было бы сокращение выбросов как минимум на 50% к 2050 году; однако это может быть излишне оптимистичным с учетом нынешних тенденций [19, 20]. Даже при ограничении выбросов CO<sub>2</sub> до 1400 Гт, 1000 Гт и 745 Гт к 2050 году вероятность повышения температуры на 2 градуса составляет 50%, 25% и 0% соответственно [20, 21].

В России скоро вступит в силу Федеральный закон № 296-ФЗ об ограничении выбросов парниковых газов, как и в некоторых других странах, но остается еще много проблем. По мнению Руслан Эдельгериев (Советника Президента РФ, специального представителя Президента РФ по вопросам климата) международное сообщество должно действовать сообща. Российская Федерация разрабатывает различные проекты в соответствии с Парижским протоколом, пытаясь вывести экономику на путь декарбонизации [22].

### **Аналитические методы выбросов парниковых газов**

Правительства используют модели и инструменты, такие как кривые предельных затрат на борьбу с выбросами (кривые MAC или MACC) в переговорах с секторами, производящими выбросы CO<sub>2</sub>, и экологами для разработки маршрутных карт для сокращения выбросов [18, 23, 26, 27]. Но есть и другие методы, которые также могут помочь в этих сделках, такие как метод максимальной прибыли и расширенная кривая MAC.

### **MAC/MACC**

Традиционная кривая MAC дает графическое представление о потенциале снижения выбросов парниковых газов и предельных затратах на меры по борьбе с выбросами за определенный период, так что наиболее экономически эффективные меры находятся на левой стороне (отрицательные значения могут сэкономить деньги) [18, 24, 29]. Кривые предельных затрат на борьбу с выбросами (MAC) стремятся преобразовать стоимость различных мер по сокращению выбросов парниковых газов (ПГ) в сопоставимые единицы, \$/тCO<sub>2</sub> [28].

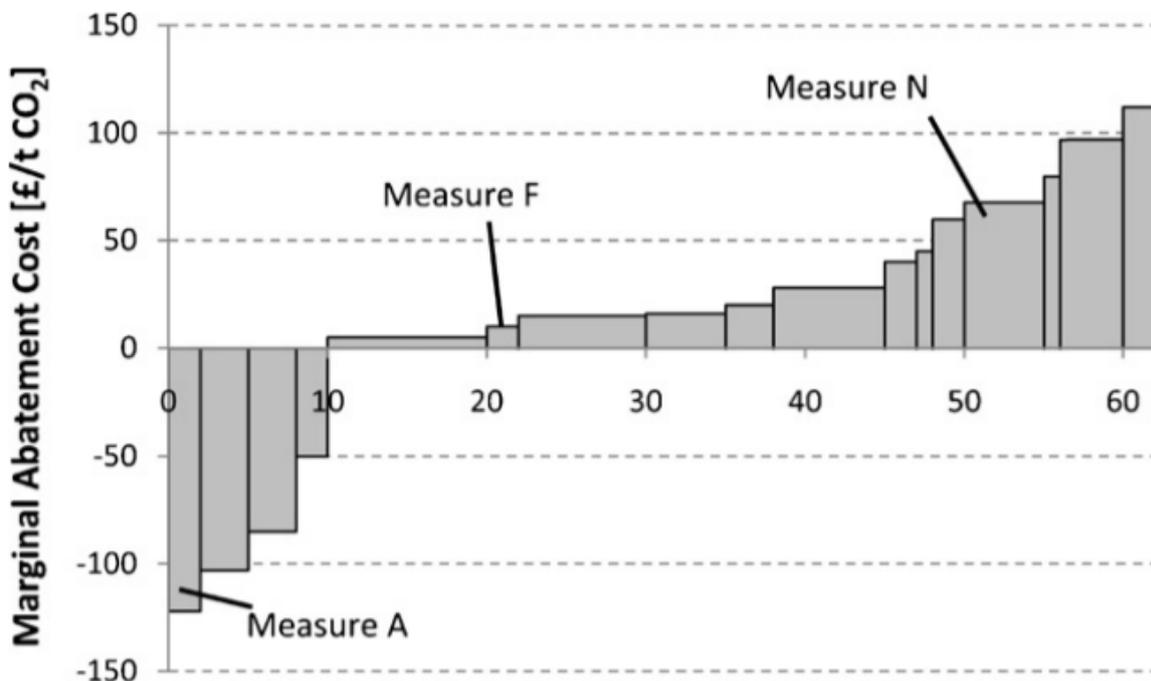


Рисунок 1 - Схема MAC [26]

Каждая полоса представляет собой результат меры сокращения (м), ширина полосы представляет потенциал сокращения выбросов парниковых газов ( $\Delta Em$ ), количество эквивалентных выбросов  $CO_2$ , которое измеряет м, потенциально может уменьшиться, а высота представляет собой предельное значение. стоимость снижения одной тонны  $CO_2$  ( $MAC_m$ ) в долларах США (USD).

Для расчета  $MAC_m$  мы можем использовать следующую формулу для каждого значения допуска  $m$ :  $\Delta Cm$  - это чистая приведенная стоимость (NPV), связанная с внедрением и эксплуатацией,  $\Delta Bm$  - это экономическая выгода, полученная за счет экономии энергии, разница между  $\Delta Cm$  и  $\Delta Bm$  соответствуют общей стоимости меры  $Cost_m$ , а  $\Delta Em$  - потенциал борьбы с выбросами (сумма тонн, забитых за исследуемый период)[18, 25].

$$MAC_m = \frac{\Delta Cm - \Delta Bm}{\Delta Em} = \frac{Cost_m}{\Delta Em}$$

Если значение  $Cost_m$  положительное, предельные затраты  $MAC_m$  также будут, небольшие значения  $MAC_m$  всегда желательны, но когда  $Cost_m$  отрицательное,  $MAC_m$  невелик с низким  $Cost_m$  или низким  $\Delta Em$ , это означает, что он работает так, как ожидалось, насколько меньше тем более желателен выброс  $CO_2$ . На изображении ниже показан пример кривой МАСС с 5 измерениями

количества CO<sub>2</sub> (1, 2, 3, 4, 5), каждое из которых дает одинаковую финансовую выгоду (\$250), это показывает ошибку в методе. Обычный МАС, потому что наиболее отрицательная мера предельных затрат (МАС<sub>m5</sub> = - 250, CO<sub>2</sub> = 1) является предпочтительной, а предпочтительной мерой должна быть 1 (МАС<sub>m1</sub> = -50, CO<sub>2</sub> = 5), которая обеспечивает большее сокращение выбросов CO<sub>2</sub> [25].

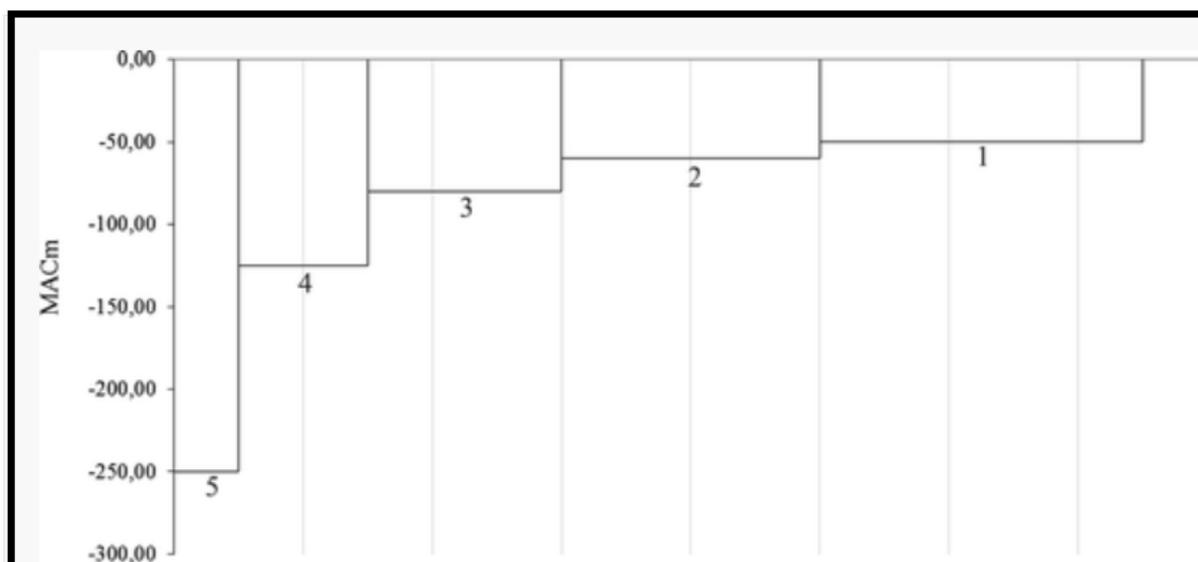


Рисунок 2 - Схема МАСС с 5 мерами [25]

### Метод максимального усиления (GM)

Это метод, который отдает предпочтение альтернативам с большим потенциалом сокращения выбросов парниковых газов и более высоким соотношением затрат и выгод, в отличие от традиционных методов, этот метод позволяет вам последовательно сравнивать отрицательные и положительные варианты затрат. Показатель GM предлагается для каждой меры по сокращению выбросов, как видно из формулы, финансовая выгода ( $\Delta Bm$ ) и инвестиции ( $\Delta Cm$ ) связаны с потенциалом сокращения выбросов парниковых газов ( $\Delta E$ ). В случаях, когда  $\Delta Cm$  равно нулю, необходимо добавить значение больше нуля и меньше или равное единице ( $\epsilon$ ) [18, 25].

$$GM = \frac{-\Delta Bm}{\Delta Cm + \epsilon} \cdot \Delta E$$

## Метод Тейлора

Он был первым автором, предложившим математическое решение, основанное на двух критериях: большее сокращение выбросов парниковых газов и более низкая стоимость применения концепции доминирования. Концепция доминирования заключается в том, что показатель А доминирует над показателем В (квадрант 4), если затраты или сокращения меньше в А [25].

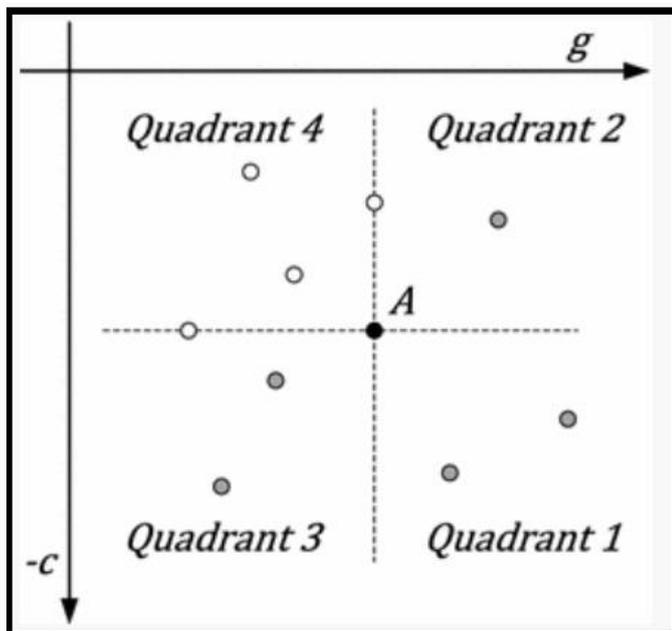


Рисунок 3 - Пример метода Тейлора [25]

## Расширенная модель МАС (ЕМАС)

Этот метод отдает предпочтение вариантам с наименьшей стоимостью и наибольшим потенциалом для сокращения выбросов парниковых газов, но также отдает предпочтение мерам с отрицательной общей стоимостью ( $Cost_m < 0$ ), таким образом, иногда предпочитая самые низкие затраты и не самый большой потенциал для сокращения. При расчете предлагается провести анализ ЕМАС для каждой меры по снижению загрязнения, в формуле есть индекс  $sign(x)$ , где он работает как  $x / |x|$  для каждого значения  $x$ , кроме нуля, если значение положительное, используется традиционный метод МАСС [18].

$$EMAC_m = Cost_m \cdot \Delta E \cdot sign(-Cost_m)$$

## Методы экологов (ENV) и жадности (GRE)

Метод экологов (ENV) классифицирует меры по сокращению с учетом только потенциала сокращения выбросов парниковых газов (уравнение 5), следовательно, это предел классификации «защитников окружающей среды». С другой стороны, жадный метод (GRE) упорядочивает меры только на основе общей стоимости меры ( $Cost_m$ ), поскольку разница между  $\Delta C_m$  и  $\Delta B_m$ , поэтому GRE является порогом классификации [25].

$$ENV_m = -\Delta E_m$$

$$GRE_m = Cost_m = \Delta C_m - \Delta B_m$$

## Заключение (Conclusions)

Это важное исследование во всем мире, объем парниковых газов в атмосфере растет все больше и больше, и это влияет на весь земной шар, вызывая изменение климата, которое влияет не только на благополучие многих людей, но и на всю земную экосистему. В качестве примера можно привести лето в северном полушарии этого года (2021 год), которое было очень нестандартным, что привело к невероятному повышению температуры, а также зима в некоторых странах южного полушария, регионах, где обычно нет снега, в последние годы это происходит.

Аналитические методы для оценки того, как мы должны уменьшить выбросы газов, имеют большое значение в этой связи для правительств и защитников окружающей среды во всем мире, чтобы решить проблему и продолжить развитие, не нанося вреда нашей планете.

## Список литературы (References):

- [1] Wang, R., Mirza, N., Vasbieva, D., Abbas, Q., & Xiong, D. (2020). The nexus of carbon emissions, financial development, renewable energy consumption, and technological innovation: What should be the priorities in light of COP 21 Agreements? *Journal of Environmental Management*, 271, 111027.
- [2] World WildLife. Alterações climáticas (2021). <https://www.worldwildlife.org>.
- [3] Azam, G. A., Zanjani, R. B., & Mood, B. M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *Journal of Research in Medical Sciences*, 21, 65.
- [4] Hooftman, N., Messagie, M., Mierlo, J. M., & Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, 1–21.
- [5] Replogle, M. A., & Lewis, M. F. (2014). A Global High Shift Scenario: Impacts and Potential for More Public Transport, Walking, and Cycling with Lower Car Use ([www.itdp.org](http://www.itdp.org)); at. Institute for Transportation and Development Policy. [www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/09/A-Global-High-Shift-Scenario\\_WEB.pdf](http://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/09/A-Global-High-Shift-Scenario_WEB.pdf).
- [6] Meylan, F. D.; Piguet, F. P.; Erkman, S. Power-to-gas through CO<sub>2</sub> methanation: Assessment of the carbon balance regarding EU directives, *Journal of Energy Storage*, Vol. 11, 2017, Pag. 16-24, ISSN 2352152X. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.12.005>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X16303413>)
- [7] Stangeland, K.; Kalai, D.; Li, H.; Yu, Z. CO<sub>2</sub> Methanation: The Effect of Catalysts and Reaction Conditions, *Energy Procedia*, Vol. 105, 2017, Pag. 2022-2027, ISSN 1876-6102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.577>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021730629X>).
- [8] Kaushika, N. D., Reddy, K. S., & Kaushik, K. (2016). Earth's planetary temperature. *Sustainable Energy and the Environment: A Clean Technology Approach*, 31–42.
- [9] Николай Пятницкий. Начало российского пути к низкоуглеродной экономике. (<https://advokatpro.com/blog/nachalo-rossijskogo-puti-k-nizkouglerodnoj-ekonomike/>).

[10] Peña, A. D. B; Vázquez, B. A.; Zamora, R. M. R; Synthesis and evaluation in the CO<sub>2</sub> capture process of potassium-modified lithium silicates produced from steel metallurgical slags, *Materials Research Bulletin*, Volume 141, 2021, 111353, ISSN 0025-5408, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025540821001501>).

[11] S.A. Rackley, *Carbon Capture and Storage*, 1st ed., Butterworth-Heinemann/ Elsevier, Burlington, Oxford, 2010.

[12] Olivier J.G.J.; Peters J.A.H.W. Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2020 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency The Hague, 2020. PBL publication number: 4331.

[13] Alatas, S. Do environmental technologies help to reduce transport sector CO<sub>2</sub> emissions? Evidence from the EU15 countries. *Research in Transportation Economics*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101047>

[14] S. Erdoğan, S.; Yıldırım, S.; Yıldırım, D. Ç.; Gedikli, A. The effects of innovation on sectoral carbon emissions: Evidence from G20 countries. *Journal of Environmental Management*, 267 (2020), p. 110637.

[15] Khan, A. N.; En, X.; Raza, M. Y.; Khan, N. A.; Ali, A. Sectorial study of technological progress and CO<sub>2</sub> emission: Insights from a developing economy. *Technological Forecasting and Social Change*, 151 (2020), p. 119862

[16] Shan, Y.; Guan, D.; Hubacek, K.; Zheng, B.; Davis, S. J.; Jia, L.; Meng, J. City-level climate change mitigation in China. *Science Advances*, 4 (6) (2018).

[17] Wang, S.; Zeng, J.; Liu, X.; Examining the multiple impacts of technological progress on CO<sub>2</sub> emissions in China: A panel quantile regression approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103 (2019), pp. 140-150

[18] Tienda, J. L. P.; Hernandez, A. V. P.; Bernal, A. S. The problem of ranking CO<sub>2</sub> abatement measures: A methodological proposal. *Sustainable Cities and Society* 26 (2016) 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.004>

[19] Pan, X., Teng, F., Wang, G., 2014. Sharing emission space at an equitable basis: allocation scheme based on the equal cumulative emission per capita principle. *Appl. Energy* 113, 1810–1818.

[20] Duro, J. A.; Gómez, J. M. G.; Vilella, C. The allocation of CO<sub>2</sub> emissions as a claims problem. *Energy Economics* 86, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104652>.

[21] Meinshausen, M.; Meinshausen, N.; Hare, W.; Raper, S.B.; Frieler, K.; Knutti, R.; Frame, D.; Allen, M. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 2009. 458 (7242), 1158–1162.

[22] Кемалов, Р. А. Стратегические инициативы Международного энергетического агентства МЭА в рамках Парижского соглашения и договора об изменении климата. Стратегический альянс «Чистый ноль к 2050 году». Риски, стратегии, климатические задачи 2050 // Природные энергоносители и углеродные материалы & Natural energy sources and carbon materials. – 2021. – № 2(08);

[23] Moran, D.; MacLeod, M.; Wall, E.; Eory, V.; Pajot, G.; Matthews, R. UK marginal abatement cost curves for the agriculture and land use, land-use change and forestry sectors out to 2022, with qualitative analysis of options to 2050. Final report to the committee on climate change, Scottish Agricultural College Commercial, Edinburgh (2008).

[24] Hernández, A. P.; Vargas, H.; Ozuna, A.; Tienda, J. P. Marginal abatement costs curve (MACC) for carbon emissions reduction from buildings: An implementation for office buildings in Colombia. *International Journal of Civil and Structural Engineering IJCSE*, 2 (1) (2015), pp. 7-15.

[25] Tienda, J. L. P.; Hernandez, A. V. P.; Bernal, A. S.; Lorente, D. B. Marginal Abatement Cost Curves (MACC): Unsolved Issues, Anomalies, and Alternative Proposals. *Carbon Footprint and the Industrial Life Cycle*, 2017. Green Energy and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54984-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54984-2_12)

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-54984-2\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-54984-2_12)

[26] Kesicki, F.; Strachan, N. Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy*, 2011.

[27] Schilb, A. V.; Hallegatte, S. Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures. *Energy Policy*, 2014.

[28] Dunant, C. F.; Skelton, A. C. H.; Drewniok, M. P.; Allwood, C. J. M. A marginal abatement cost curve for material efficiency accounting for uncertainty. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019.

[29] Tomaschek, J. Marginal abatement cost curves for policy recommendation – A method for energy system analysis. *Energy Policy*, 2015.