

DOI: 10.12737/article\_5a27cb917982b8.35955780

Авилова И.П., канд. экон. наук, проф.,  
Крутилова М.О., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ЭКООРИЕНТИРОВАННАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТОИМОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ГЭС

kafeun@mail.ru

Хозяйственно-экономическая деятельность, связанная с энергетической отраслью, является основным «топливом» для социально-экономического развития страны и оказывает значительное воздействие на окружающую среду. Поэтому актуальной проблемой в современном обществе становится сокращение и стабилизация уровней парниковых газов, прежде всего  $CO_2$ , во избежание худших прогнозируемых последствий изменения климата. С экологической и экономической точек зрения снижение выбросов парниковых газов на стадии строительства инфраструктурных объектов является не менее важной задачей, чем снижение выбросов во время эксплуатации, в том числе генерации энергии. Стоит отметить, что выбросы парниковых газов в строительной отрасли покрывают значительную часть промышленных выбросов парниковых газов и, как ожидается, будут последовательно увеличиваться. Проблема может быть успешно решена как с помощью экономических, так и организационных ограничений, основанных на усовершенствованных алгоритмах ценообразования и штрафования возможного экологического ущерба на проектной стадии в строительстве.

**Ключевые слова:** экостоймость, устойчивое развитие, экодевелопмент, экоориентированное ценообразование, выбросы парниковых газов.

**Введение.** Каждый источник энергии (уголь, газ, вода, ветер и др.) имеет свои преимущества и недостатки в отношении следующих показателей: эксплуатационных расходов, воздействия на окружающую среду и других факторов. При использовании любого метода генерации энергии происходит выброс ПГ в различных количествах за счет строительства, эксплуатации (деятельности по поставке топлива) и вывода из эксплуатации. Некоторые методы генерации энергии, такие как угольные электростанции, выпускают большинство ПГ во время эксплуатации станции и во время выработки энергии. Другие, такие как ветроэлектростанции и гидроэлектростанции,

выбрасывают большую часть ПГ на стадии строительства и вывода из эксплуатации объекта. Следовательно, нормализация выбросов жизненного цикла с использованием электрической генерации позволяет проводить справедливое сравнение различных методов генерации энергии на основе приведенного показателя  $1кВт\cdotч$ .

Показательным параметром, характеризующим энергетику и экономику стран, принято считать удельную углеродоемкость экономики – все выбросы  $CO_2$  от сжигания ископаемого топлива, деленные на общий объем произведенной продукции, товаров и услуг. На рис. 1 графически представлена углеродоемкость различных методов выработки электроэнергии [1].

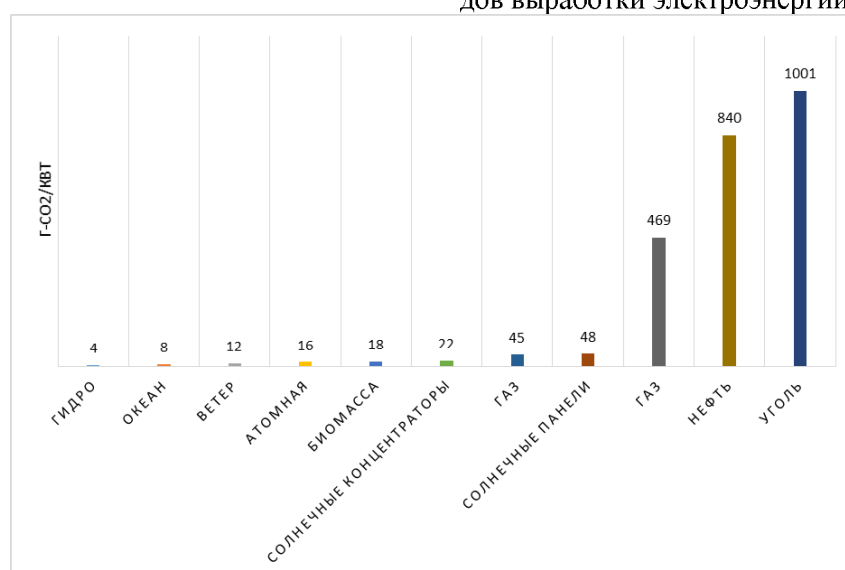


Рис. 1. Интенсивность выбросов углекислого газа по типам генерации электроэнергии

Электростанции вне зависимости от источника энергии укрупненно можно разделить на:

1. Инфраструктурный объект как объект не-движимости;
2. Совокупность установок, оборудования и аппаратуры, используемых непосредственно для производства электрической энергии.

В соответствии с ГОСТ Р 56276-2014/ISO/TS 14067:2013 «Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению и предоставлению информации» выбросы парниковых газов должны рассматриваться на протяжении всего жизненного цикла инфраструктурного объекта, в том числе на стадии строительства [2].

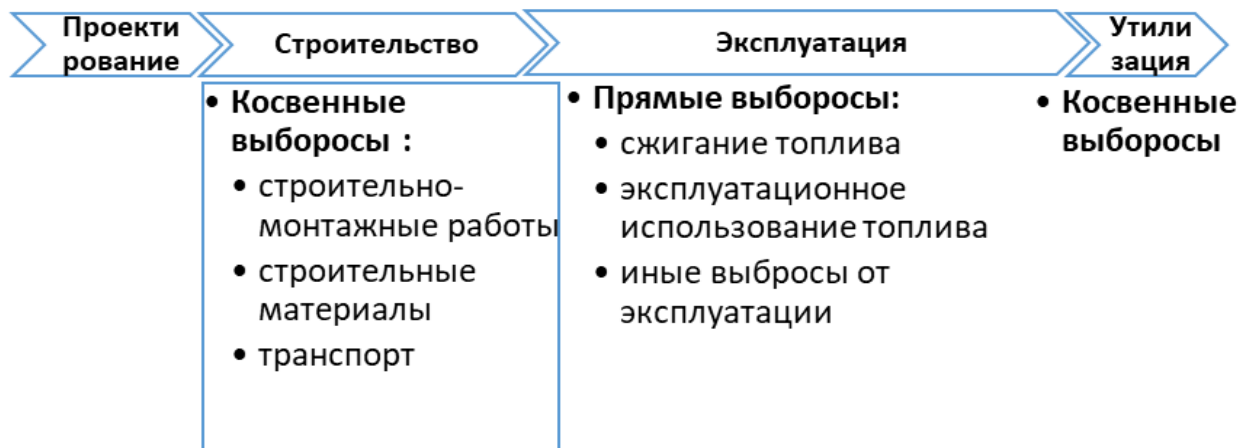


Рис 2. Жизненный цикл выбросов ПГ

Источники косвенных выбросов для электростанций включают выбросы от:

- развития инфраструктуры (например, дорог и линий электропередачи),
- строительно-монтажные работы на объекте,
- производство строительных материалов, изделий, конструкций и оборудования,
- транспортировка строительных материалов и рабочих,
- вывод из эксплуатации и утилизация отходов [3].

Выбросы электростанций должны анализироваться в соответствии с подходом анализа жизненного цикла ПГ (LCA), включая выбросы на этапе строительства объекта, которые считаются косвенными выбросами [4]. Для обоснования актуальности выбранной темы, необходимо сравнить сметную стоимость строительства (ССР) по отношению к общей стоимости проекта (ИСП) для различных типов электростанций. Важно отметить, что существует достаточное количество энергетических объектов, которые требуют высоких затрат на строительство. Используя данные Управления энергетической информации США “Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants” авторам было проведено ранжирование, результаты которого представлены на рис. 3.

Ранжирование позволяет предварительно оценить эффективность «зеленых» строительных технологий для различных типов электростанций

и выбрать приоритетные типы для «озеленения» уже на стадии строительства. Исходя из полученных данных, наиболее дорогостоящим и ресурсоемким сооружениями являются гидроэлектростанции (50 %) и солнечные фотоэлектрические станции (17 %). На примере ГЭС рассмотрим методику определения выбросов от наиболее энергозатратных строительных и монтажных работ и используемых строительных материалов и методику учета этих выбросов при составлении сметной документации на строительство объекта. Поэтому прежде всего, необходимо рассмотреть процесс строительства ГЭС для выявления основных используемых строительных материалов и строительно-монтажных работ, включая их количественные значения.

По данным исследования «Запасы жизненного цикла энергетических систем» авторов Роберта Донса и др. [4] основными источниками выбросов парниковых газов для гидроэнергетики на стадии строительства являются производство строительных материалов, а именно бетона и стали, а также использование дизельного топлива и электроэнергии во время строительно-монтажных работ (СМР). Х.Л. Раадаль в своей работе: «Переосмысление энергии» (2011 год) определил, что “основными факторами, способствующими выбросам ПГ в инфраструктуру, являются производство бетона и транспортировка строительных материалов при строительстве гидроэлектростанций” [5].



ГАЭС – Гидроаккумулирующая электростанция; ГЭС – Гидроэлектростанция»;

СФЭС – Солнечные фотоэлектрические станции; АЭС – Атомная электростанция; ВЭС – Наземная ветровая электростанция; УЭС – Угольная электростанция; ПВЭС – Прибрежная ветровая электростанция;

ТЭС КЦ – Теплоэлектростанции комбинированного цикла; КСЭС - Концентрированная солнечная энергия; ГТУЭС – Газотурбинные электростанции; ТЭС ПГ – Электростанции с комбинированным циклом, работающих на природном газе; ТЭС ТП – Электростанции на твердом топливе; ТЭС КЦ (ПГ) – Электростанции с комбинированным циклом комплексной газификации; ГеоЭС – Геотермальные электростанции.

Рис. 3. Ранжирование типов электростанций по сметной стоимости строительства (ССР) в отношении общей стоимости инвестиционно-строительного проекта (ИСП)

Общее энергопотребление сооружений зависит от строительных материалов, изделий, конструкций и строительно-монтажных работ, используемых при строительстве, а также ранее потраченной энергии на транспортировку, производство и т.д. [6]. В этом случае важны класс экологической безопасности используемых материалов и класс энергобезопасности используемой технологии строительства. Таким образом, необходимо учитывать загрязнение окружающей среды и уменьшать выбросы на предпроектной и проектной стадиях, тем самым смягчая экологические последствия строительства сооружений. Для крупных гидроэнергетических строительных проектов в стоимости инвестиционно-строительного проекта преобладают сметная стоимость СМР и стоимость оборудования. На стоимость СМР влияет множество факторов, такие как местоположение, конструктивные и технологические решения и т.д. [7]. Процесс формирования цены на строительную продукцию в мировой практике показывает, что каждая страна имеет

собственные котировки цен, которые устанавливают прямую и косвенную текущую стоимость ИСП. Используя эти данные, можно укрупненно оценить сметную стоимость основных строительных ресурсов (материалов, машин и механизмов), используемых для строительства ГЭС, в общей стоимости ИСП, и пересчитать ее на самостоятельную стоимость этапа строительства, определенную энергии на 1 МВт-ч.

Для определения возможной корреляции между объемами основных строительных материалов и строительно-монтажных работ и установленной мощностью ГЭС был проведен нелинейный регрессионный анализ. Для моделирования в технико-экономических процессах, которые всегда состоят из нелинейных (нерегулярных, стохастических) и линейных (регулярных, систематических) частей, авторами предлагаются К-полиномы n-й степени – универсальные гиперболические функции, отражающие рассматриваемые зависимости следующим образом [8]:

$$Y = a_{(-n)}x^n + a_{(-(n-1))}x^{n-1} + \dots + a_0x^0 + \dots + a_{n-1}x^{-(n-1)} + a_nx^{-n},$$

где Y – расходы на строительство 1 МВт станции, X – установленная мощность станции,  $a_i$  – константы,  $x^0$  – фиктивный показатель (всегда равный 1), используемый для ясности структуры.

Левая часть к-полиномов ( $a_{(-n)}x^n + a_{(-(n-1))}x^{n-1}$ ) используется для аппроксимации нелинейных частей процессов, а правая ( $a_0x^0 + \dots + a_{n-1}x^{-(n-1)} + a_nx^{-n}$ ) используется для аппроксимации линейной части аппроксимируемых процессов.

Предлагаемый К-полином может быть упрощен в:

- 1) линейную функцию ( $i = 1; a_{(-1)} \dots a_0 = \text{const}, a_1 = 0$ );
  - 2) полиномы n-й степени ( $a_{(-n)} \dots a_0 = \text{const}; a_1 \dots a_n = 0$ );
  - 3) экспоненциальную функцию n-й степени ( $a_n \dots a_0 = \text{const}; a_{(-n)} \dots a_{(-1)} = 0$ );
- или использован в исходном виде для объединения преимуществ всех вышеперечисленных функций. Это подтверждает полезность предлагаемого выражения для обработки многофакторных процессов в технико-экономическом ана-

лизе. Корреляцию объемов основных строительных материалов, строительно-монтажных работ (наиболее вредных в отношении выбросов ПГ) и генерируемой мощностью ГЭС предлагается выразить К-полиномом 1-й степени следующим образом:

$$Y = ax + bx^{-1},$$

где  $a, b$  – константы,  $x$  – анализируемая переменная в соответствии с табл. 1.

Все переменные анализируются отдельно (число степеней свободы равно 1, число переменных 8), согласно первоначальному предложению о значительной корреляции между установленной мощностью ГЭС и следующим:

а) основные строительно-монтажные работы:

- выемка мягкого грунта,
- выемка скального грунта,
- насыпь мягкого грунта,
- каменные наброски, дренажи, фильтры,
- б) основные строительные материалы:
  - бетон и железобетон,
  - металлоконструкции и механизмы.

Полученные регрессионные зависимости (рис. 4) получены методом наименьших квадратов – стандартным подходом к оптимизации приближенного решения. Сила корреляционной связи подтверждается значением  $R_2 > 0,75$ . Статистическая значимость моделей подтверждается тестом Фишера при обеспеченности 0,95 – полученное значение F-тест  $< F(0,05; 1; 8)$ , что позволяет отклонить  $H_0$ -гипотезу и принять модель для дальнейшего анализа.

Таблица 1

### Основные строительно-монтажные работы и материалы, используемые при строительстве ГЭС, на 1 МВт установленной мощности

Мощность ГЭС, МВт	63	150	220	300	342	800	1000	1600
Выемка мягкого грунта, 100 м <sup>3</sup>	376.2	61.5	97.6	43.6	14.0	25.3	18.5	9.7
Выемка скального грунта, 100 м <sup>3</sup> *	6.0	12.0	5.8	2.0	4.1	1.8	2.1	0.3
Насыпь мягкого грунта, 100 м <sup>3</sup>	317.5	94.1	114.5	113.6	110.7	73.6	4.1	3.7
Каменные наброски, дренажи, фильтры, 100 м <sup>3</sup>	82.1	7.0	41.0	11.2	3.8	1.3	1.3	0.1
Бетон и железобетон, 100 м <sup>3</sup>	319.0	21.3	16.1	20.1	8.3	5.6	14.9	32.0
Металлоконструкции и механизмы, 1 т	60.3	29.7	15.6	26.7	18.4	9.2	9.8	17.7

\*Не найдено статистически значимой корреляции для выемки скального грунта на 1 МВт, поэтому строительная работа отсутствует в дальнейшем анализе.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) Объемы основных строительных материалов и строительно-монтажных работ, используемых при строительстве ГЭС, имеют значительную корреляцию с объемом генерирующей мощности назначенных ГЭС в МВт. Корреляции аппроксимированы предлагаемым К-полиномом 1-й степени, пригодным для дальнейшего анализа и управления [8].

2) Объемы основных строительных материалов и строительно-монтажных работ в пересчете на 1 МВт генерируемой мощности обратно зависят от общей установленной мощности ГЭС, резко уменьшаясь при мощности ГЭС 400 МВт и незначительно после 400 до 1000–1500 МВт. Производимая электрическая энергия при работе ГЭС мощностью более 600–800 МВт имеет ряд преимуществ, т.к. для генерации энергии затраты на материалы и использование строительной техники существенно снижаются. Поэтому при благоприятных условиях и возможности реализации инфраструктурных объектов выявлена зависимость: чем больше мощность ГЭС, тем более вы-

годно и менее затратно строительство, а, следовательно, уменьшается экологический вред, наносимый данным процессом.

Следующий этап в оценке стоимости строительства инфраструктурных объектов с позиции экологичности это разработка алгоритма определения выбросов парниковых газов на единицу объема основных строительных материалов и на единицу объема основных работ, выполняемых при строительстве инфраструктурных объектов. Для оценки определены основные строительно-монтажные работы и материалы, представленные в табл. 1. Используя данные о выбросах, можно количественно определить выбросы на единицу объема материалов или на кВт мощности двигателя строительных машин и механизмов. Результаты проведенного анализа представлены в табл. 2, 3, 4. Для разработки алгоритма были рассмотрены основные широко распространенные строительные материалы (бетон, сталь) и машины, механизмы конкретной мощности (экскаватор, кран, бортовой автомобиль, бетономеситель, сварочный аппарат). При достаточных исходных данных о выбросах ПГ в представленном

алгоритме возможна корректировка и добавление большего количества строительных материалов и типов машин и механизмов, т.е. новых источников загрязнения [9].

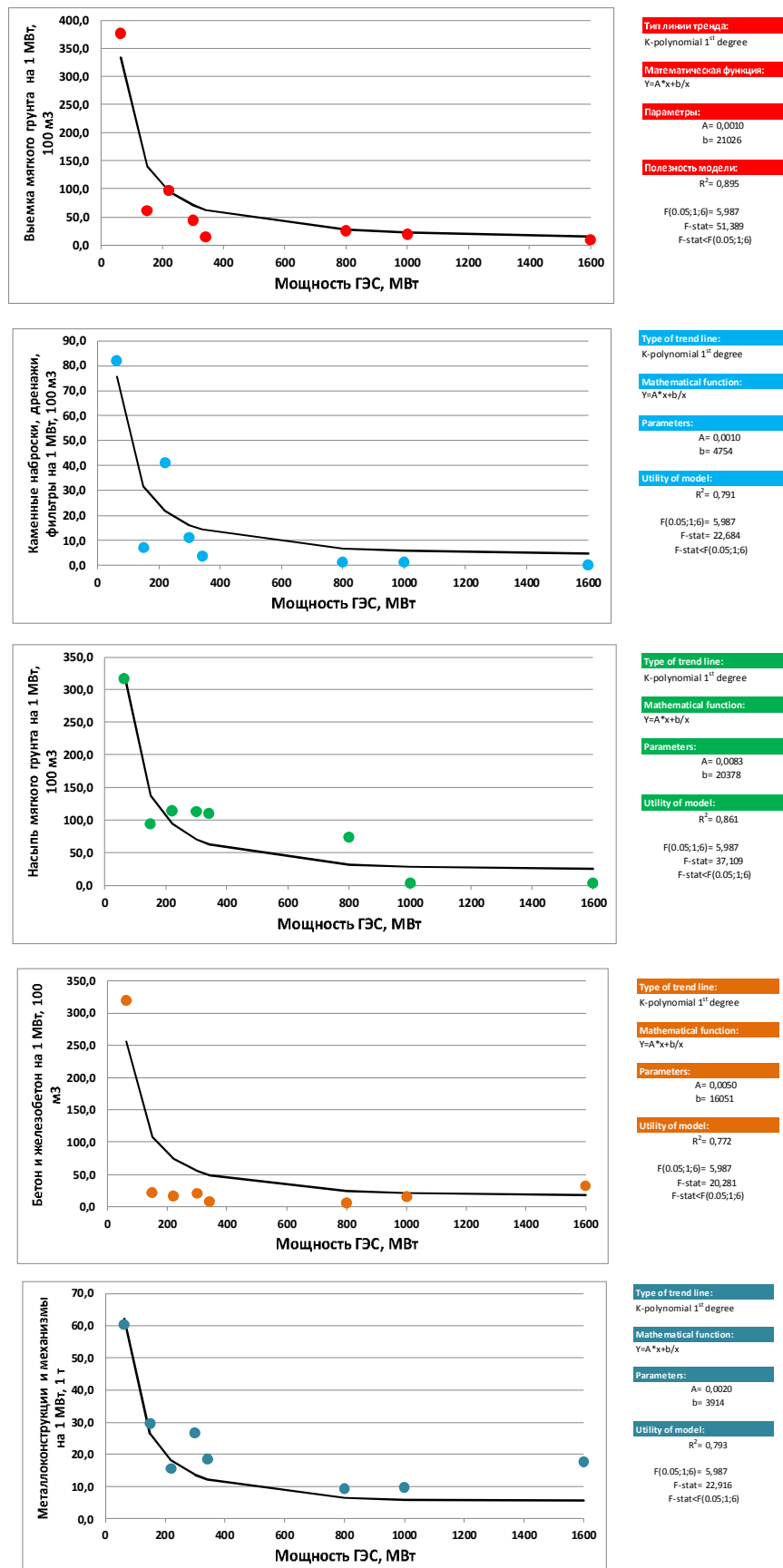


Рис. 4. Нелинейная регрессия для выемки мягкого грунта в пересчете на 1 МВт

Таблица 2

**Выбросы парниковых газов от производства 1 м<sup>3</sup> типового бетона**

Выбросы ПГ	Ед.изм.	
Общие	кг	<b>1,50848</b>
CO <sub>2</sub>	кг	1,5
CO	г	0,86
NO <sub>x</sub>	г	2,3
SO <sub>x</sub>	г	3,3
CH <sub>4</sub>	г	1,7
HC	г	0,32

Таблица 3

**Выбросы парниковых газов от производства стали**

Производство	Ед.изм.	Выбросы ПГ
Металлургический комплекс	Тонны на тонну продукта	1,6-2,2
Переработка металлолома		0,6-0,9

Таблица 4

**Выбросы парниковых газов от работы строительных машин**

Тип машины	Мощность двигателя, кВт	Выбросы ПГ
Экскаватор	246	2,76 г/м <sup>3</sup>
Бортовой автомобиль	176	69 г/с
Кран	120	46 г/с
Бетономеситель	115	77 г/с
Сварочный аппарат	6	33 г/кг

В результате сбора информации об источниках загрязнения атмосферы определим алгоритм получения общей эмиссии парниковых газов от

строительства типовой ГЭС. Для этого воспользуемся специальным калькулятором выбросов парниковых газов (таблица 5).

Таблица 5

**Калькулятор выбросов парниковых газов: строительно-монтажные работы (СМР)**

Машины и Механизмы	Объем	Материалы	Объемы
<b>1. Бортовой автомобиль</b>		<b>1. Бетон</b>	
Мощность двигателя, кВт	176	Оценочная эмиссия парниковых газов для производства цемента, г/куб.м.	1508
Грузоподъемность, т	10	Расчетный объем бетона, куб.м	2704
Расчетное рабочее время, ч	1227	<b>Общее количество выбросов ПГ, т</b>	<b>4.1</b>
Оценочная эмиссия парниковых газов, г/с	24.5	<b>2. Сталь конструкционная</b>	
	<b>108</b>	Оценочная эмиссия парниковых газов для производства цемента, т/т	0.6
<b>2. Кран</b>		<b>Общее количество выбросов ПГ, т</b>	<b>108</b>
Мощность двигателя, кВт	120		
Грузоподъемность, т	8		
Расчетное рабочее время, ч	184		
Оценочная эмиссия парниковых газов, г/с	46		
<b>Общее количество выбросов ПГ, т</b>	<b>18.9</b>		
<b>3. Бетономеситель</b>			
Мощность двигателя, кВт	115		
Объем смешивания, м <sup>3</sup> / час	71		
Расчетное рабочее время, ч	57		
Оценочная эмиссия парниковых газов, г/с	77		
<b>Общее количество выбросов ПГ, т</b>	<b>15.8</b>		
<b>4. Сварочный аппарат</b>			
Мощность, кВт	6	<b>Общая эмиссия парниковых газов от стр. материалов, т</b>	<b>112</b>
Расчетное рабочее время, ч	218	<b>Общая эмиссия парниковых газов от стр. машин и механизмов, т</b>	<b>149</b>
Оценочная эмиссия парниковых газов, г/с	33	<b>Общая эмиссия парниковых газов от СМР, т</b>	<b>265</b>
<b>Общее количество выбросов ПГ, т</b>	<b>5.9</b>		

При строительстве зданий и сооружений возникающие выбросы ПГ должны регулироваться с помощью экоштрафов. Все возможные выбросы, определяемые на этапе проектирования в рамках экологической экспертизы, должны

быть переведены в денежный эквивалент (экоштрафы) в соответствии с предлагаемым методом оценки:

Эко-штраф = стоимость профилактических мероприятий (Costofprevention, COP) + стоимость санитарных работ после причинения вреда (Costofsanitation, COS),

Поскольку обоснованием для эко-штрафов является, в конечном итоге, выброс ПГ на единицу штрафуемого материала/работы/услуги, то стоимость профилактических мероприятий (Costofprevention, COP) определяется как:

$$COP = (COP1 \times k1 + COP2 \times k2 + COP3 \times k3) \times k4,$$

COP1 – стоимость НИОКР, направленных на исследование экологичности данного материала/технологии и получения движения за истекший год, деленная на объем выбросов на производстве материала/оказании услуг (COP1).

COP2 – разница в стоимости материалов/услуг, производимых по наиболее экологичной на текущий год технологии к стоимости тех же материалов/услуг, производимых по технологии, указанной конкретным производителем, материал/услугу которого следует штрафовать.

COP3 – разница в объеме материала/услуги, произведенного за предпоследний и истекший года умноженная на усредненную по региону стоимость материала/услуги.

$k1 \dots k3$  – весовые индексы,  $k4$  – показатель активности.

COP1 – стимулирует финансирование научных исследований,

COP2 – переход производителей на зеленые технологии;

COP3 – стимулирует использование менее материалоемких решений с позиции экологичности.

Общая масса разрешенных к выбросу ПГ определяется Киотским протоколами, стоимость прав на выбросы определяется рынком эмиссионных квот. Стоимость санитарных работ после причинения вреда (Costofsanitation, COS) для всех производителей и поставщиков услуг:

$$COS = RGT \times k5,$$

RGT – Regional Carbon Tax, стоимость квоты на выброс тонны ПГ на текущий год в стране,  $k5$  – удельный вес строительства в экономике государства.  $k5$  = стоимость услуг по виду деятельности "Строительство" / ВВП страны за год.

$$\text{Эко-штраф} = RCT \times k5 + (COP1 \times k1 + COP2 \times k2 + COP3 \times k3) \times k4$$

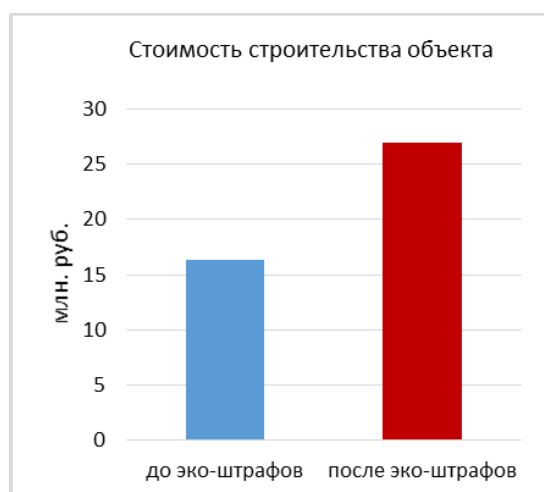


Рис. 5. Влияние экоштрафов на стоимость строительства объекта строительства

**Выводы.** Приведенный метод экоориентированного ценообразования и определения сметной стоимости объектов строительства с позиции устойчивого развития позволяет проводить сравнительный анализ альтернативных вариантов используемых технологий и материалов в соответствии с возможным экологическим ущербом. Этот технический метод, основанный на выборе основных строительных материалов, работ, машин и т.д. позволяет оценить сметную стоимость строительства до и после эко-штрафов и может быть эффективным дополнительным инструмен-

том на предпроектном и проектом этапах инвестиционно-строительных проектов. Совместно с государственной поддержкой и совершенствованием российского законодательства, представленный метод штрафования является эффективным способом снижения экологического вреда, причиненного строительным сектором.

*\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Korppoo A., Kokorin A. Russia's 2020 GHG emissions target: emission trends and implementation // *Climate Policy*. 2015. С. 1-10.
2. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] // СПС «Консультант плюс». Режим доступа: <http://www.consultant.ru/>
3. Avilova I, Naumov A, Krutilova M. Methodology of cost-effective eco-directed structural design // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, № 53. С. 255–261.
4. Полётова Е.В., Абакумов Р.Г., Наумов А.Е. Экономические проблемы ресурсосбережения при реконструкции промышленных зданий //

Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2016. № 2 (12). С. 201–205.

5. Avilova I., Krutilova M., Peresyphina E. Economic incentives of green standards in civil and municipal engineering // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. № 53. P. 551–557.

6. Авилова И.П., Наумов А.Е., Крутилова М.О. Экономические и правовые аспекты экоориентированного аудита в строительстве // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 212–216.

7. Крутилова М.О. Эколого-экономические аспекты устойчивого развития предприятий

строительной индустрии [Электронный ресурс] // Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Белгород. 2016. С. 4889–4892.

8. Ходыкина И.В., Крутилова М.О. Основные аспекты экологического законодательства Российской Федерации в сфере строительства // Вестник научных конференций. 2016. № 3-2 (7). С. 100–102.

9. Наумов А.Е., Иванов А.В., Куннуев Ю.Ш. Модели программных решений при управлении развитием городского хозяйства в условиях неопределенности // Недвижимость: экономика, управление. 2016. № 2. С. 51–58.

#### Информация об авторах

**Авилова Ирина Павловна**, кандидат экономических наук, профессор кафедры экспертизы и управления недвижимостью.

E-mail: kafeun@mail.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Крутилова Мария Олеговна**, аспирант кафедры экспертизы и управления недвижимостью.

E-mail: marykrutilova@gmail.com.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

Поступила в октябре 2017 г.

© Авилова И.П., Крутилова М.О., 2017

---

**Avilova I.P., Krutilova M.O.**

### **METHODOLOGY OF GHG EMISSIONS ASSESSMENT CAUSED AT THE CONSTRUCTION STAGE OF ENERGY FACILITIES. CASE STUDY: HYDROPOWER**

*Economic growth is the main determinant of the trend to increased greenhouse gas (GHG) emission. Therefore, the reduction of emission and stabilization of GHG levels in the atmosphere become an urgent task to avoid the worst predicted consequences of climate change. GHG emissions in construction industry cover a significant part of industrial GHG emissions and are expected to consistently increase. From an ecological and economic point of view, reducing greenhouse gas emissions to the stage of infrastructure facilities is no less important than reducing emissions during operation, including generation of energy. The problem could be successfully solved with a help of both economic and organizational restrictions, based on enhanced algorithms of calculation and penalization of environmental harm in construction.*

**Keywords:** green estimated cost, sustainable development, ecodevelopment, green pricing, GHG emissions.

---

#### Information about the authors

**Avilova Irina Pavlovna**, PhD, Professor.

E-mail: kafeun@mail.ru.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Krutilova Maria Olegovna**, Research assistant.

E-mail: marykrutilova@gmail.com.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

Received in October 2017

© Avilova I.P., Krutilova M.O., 2017