

**У ИСТОКОВ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ:
ВКЛАД В ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПОНЯТИЯ ПРИВЕДЕННЫХ
ЗАТРАТ У. ТОМСОНА (КЕЛЬВИНА) И В. Г. ШУХОВА**

СТАНИСЛАВ ВИКТОРОВИЧ ВАСИЛЬЕВ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
E-mail: vsvict@mail.com

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ КЛЮЧКО

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
E-mail: vnk2000@mail.ru

В статье рассматривается история появления такого важного для экономических расчетов понятия, как приведенные затраты. Методика их использования была основной при экономическом обосновании выбора различных вариантов технических решений на протяжении почти всего XX в. У истоков этой методики стояли два великих ума рубежа XIX–XX вв. — У. Томсон (Кельвин) и В. Г. Шухов. Решая прикладные инженерные задачи, они первыми поняли, что одних технических характеристик может не хватить для получения лучшего инженерного решения и дополнительно привлекли экономические данные. Формулы, использованные ими для своих расчетов, практически аналогичны современной формуле приведенных затрат и могут прямо быть использованы для поиска оптимальных инженерных решений. Без появления этих расчетов вряд ли такими бурными темпами развивались электроэнергетика и нефтяная промышленность.

Ключевые слова: У. Томсон (Кельвин), В. Г. Шухов, приведенные затраты, экономическая эффективность, оптимальное решение, электропередача, нефтепровод.

THE ORIGINS OF ENGINEERING ECONOMIC CALCULATIONS: THE CONTRIBUTION OF W. THOMSON (LORD KELVIN) AND V. G. SHUKHOV TO THE FORMULATION OF THE REDUCED COST CONCEPT

STANISLAV VIKTOROVICH VASILIEV

*Bauman Moscow State Technical University
Ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, Moscow, 105005, Russia
E-mail: vsvict@mail.com*

VLADIMIR NIKOLAEVICH KLYUCHKO

*Bauman Moscow State Technical University
Ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1, Moscow, 105005, Russia
E-mail: vnk2000@mail.ru*

The paper reviews the history of emergence of the reduced cost concept which is very important for economic calculations. The methodology for using this concept has been the methodology predominantly used for feasibility analysis of different technical solutions throughout almost the entire 20th century. The originators of this methodology were two great minds of the 19th and 20th century, W. Thomson (Lord Kelvin) and V. G. Shukhov. They were the first to realize that, while tackling the practical engineering tasks, technical features only may not be sufficient for obtaining the best engineering solution, and to employ additional, economic data for this purpose. The mathematical formulas they used for their calculations are practically identical to the modern reduced cost formula and may be directly used for finding the optimal engineering solutions. Without these calculations, electrical power engineering and oil industry would have hardly developed at such torrid pace.

Keywords: W. Thomson (Lord Kelvin), V. G. Shukhov, reduced cost, cost-effectiveness, optimal solution, electric power transmission, oil pipeline.

В истории техники найдется не так много случаев, когда при решении существенно технических задач исследователям удавалось получить результаты, значимые для экономической науки в целом. И еще меньше случаев, когда это были результаты, без преувеличения, «нобелевского» уровня. Об одном из таких экономических достижений физиков и инженеров конца XIX в. мы и хотим рассказать.

Сегодня, наверное, трудно отыскать инженера или экономиста, который бы не слышал о «приведенных затратах». Это и не удивительно, тем более что очень долгое время (по меньшей мере, до начала 2000-х гг.) в каждом курсе прикладной экономики, читаемом как в технических, так и в экономических вузах, им уделялось большое внимание. Более того, используемые в течение 1970–1980-х гг. официальные методики оценки экономической эффективности в части сравнения вариантов капиталовложений также базировались именно на данном показателе.

В современном понимании приведенные затраты – важнейший из показателей сравнительной экономической эффективности капитальных вложений, представляющий собой сумму текущих затрат (себестоимости)

и капитальных вложений, приведенных к одинаковой размерности в соответствии с нормативом эффективности¹. Соответственно, наилучшим вариантом капиталовложений будет тот, который обеспечивает минимум приведенных затрат, т. е.:

$$C_i + E_n \times K_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где K_i – капитальные вложения по каждому варианту, C_i – текущие затраты (себестоимость) по тому же варианту, E_n – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений. В СССР на XI пятилетку (1981–1985) по народному хозяйству в целом E_n был принят на уровне не ниже 0,12.

К сожалению, как в институтских курсах, так и в утвержденных правительством СССР и его органами методиках не содержалось, как правило, никаких указаний на то, где и почему появилось само это понятие «приведенные затраты»². Но из всякого правила, как известно, есть исключения и нам, например, историю «приведенных затрат» рассказывал наш учитель профессор Ю. А. Абрамов, когда читал спецкурс экономики предприятия для аспирантов. Из него-то мы и узнали о существовании так называемой «задачи Шухова – Кельвина» и о ее роли в создании методов оценки экономической эффективности инженерных решений.

Если к постановке и решению данной задачи подходить хронологически, то начинать ее рассмотрение нужно, конечно, с очень небольшой по объему (всего 3 стр.) работы британского физика и механика, профессора сэра Уильяма Томсона, с 1892 г. – барона (лорда) Кельвина (рис. 1). Занимаясь, среди прочего, проблемами электротехники, он в 1881 г. опубликовал в «Отчетах Британской ассоциации содействия развитию науки» доклад «Об экономии металла в проводниках электричества»³. Задача, которую решал Томсон,

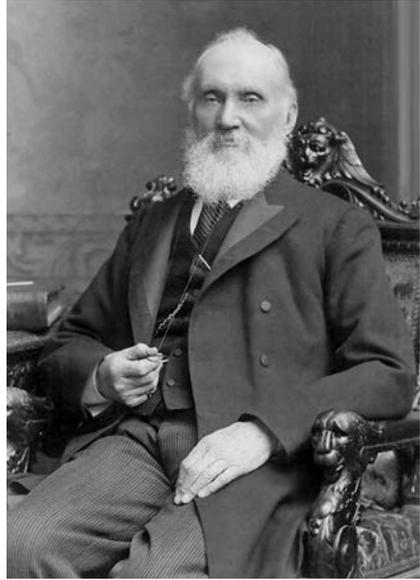


Рис. 1. Сэр Уильям Томсон, барон Кельвин

¹ Временная типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений // Экономическая газета. 1981. № 2–3 (см. также: <http://www.niec.ru/Met/met010.htm>).

² Интересно, что в последние годы появились публикации, где в качестве авторов идей, позволивших принять приведенные затраты в качестве критерия для обоснования сравнительной эффективности капитальных вложений, указаны советские экономисты 1960-х гг. Л. А. Вааг, З. В. Атлас и И. С. Малышев (см.: Кузьмин В. Н. Развитие методов определения экономической эффективности // <http://www.e-rej.ru/Articles/2008/Kuzmin.pdf>).

³ Thomson, W. On the Economy of Metal Conductors of Electricity // Report of the Fifty-First Meeting of the British Association for the Advancement of Science; Held at York in August and September 1881. London: John Murray. P. 526–528.

заклучалась в поиске наиболее экономически обоснованного размера электрического проводника, служащего для передачи электрической энергии. В то время электричество только начало широко применяться для организации освещения городов, что, в свою очередь, потребовало создания мощных электрических машин для генерации электроэнергии. Проблема заключалась в том, что существовавшие первичные источники энергии, приводившие в действие электрогенераторы, были основаны или на энергии пара, или на энергии воды. И в том, и другом случае источник первичной энергии (уголь или река с достаточным перепадом высот) располагались на достаточно большом расстоянии от потребителей электроэнергии, находившихся в городах.

Тогда в науке не существовало единого мнения относительно самой возможности передачи электрической энергии на большие расстояния, этот вопрос требовал дополнительных экспериментальных исследований. Только в 1873 г. на выставке в Вене французский предприниматель и изобретатель Ипполит Фонтен (*Hippolyte Fontaine*, 1833–1910) продемонстрировал кабель длиной около одного километра для уменьшения передаваемой электрической мощности, используемой для работы насоса (без кабеля насос выталкивал воду)⁴. И хотя сам Фонтен считал электропередачу экономически невыгодной, 1873 г. называют годом начала истории электропередачи. Потери в линии можно было уменьшить двумя путями: а) увеличением сечения проводов; б) повышением напряжения. Попытку идти первым путем предпринял русский военный инженер и изобретатель Федор Аполлонович Пироцкий (1845–1898). Он применил в качестве проводника железнодорожные рельсы, сечение которых более чем в 600 раз превышало сечение обыкновенного телеграфного провода⁵. О необходимости увеличения сечения провода до диаметра 75 мм говорил и немецкий инженер и промышленник Эрнст Вернер фон Сименс (1816–1892) после того как побывал в 1876 г. на Ниагарском водопаде и оценил его энергетические возможности. По его заявлению, «в изготовление проводов (имелась в виду передача электроэнергии на расстояние 50 км от Ниагары до потребителей. — С. В., В. К.) придется загнать целый медный рудник»⁶. Вторая возможность снижения потерь при передаче электрической энергии, основанная на повышении напряжения, требовала теоретического обоснования. Оно было дано в 1880 г. в выполненных независимо друг от друга в работах французского инженера (впоследствии академика) Марселя Депре (*Marcel Deprez*, 1843–1918) и профессора физики Петербургского лесного института Дмитрия Александровича Лачинова (1842–1902). Вывод, к которому пришли эти ученые, выглядел обескураживающим: получалось, что КПД установки, состоявшей из электродвигателя и линии передачи, не зависит от сопротивления самой линии (т. е. от диаметра провода)! Действительно,

⁴ Белькинд Л. Д., Веселовский О. Н., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История энергетической техники. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. С. 315.

⁵ Веселовский О. Н., Шнейберг Я. А. Очерки по истории электротехники. М.: Изд-во МЭИ, 1993. С. 167.

⁶ Цит. по: там же.

любое увеличение потерь из-за уменьшения диаметра проводника можно было компенсировать повышением передаваемого напряжения ⁷.

Таким образом, стало очевидно, что рассчитать оптимальный размер проводника, основываясь только на технических исходных данных и критериях (КПД), невозможно. Однако, несмотря на это, решение все же нашлось.

В опубликованном Томсоном докладе для определения оптимальной площади сечения проводника в инженерный расчет были включены экономические параметры. При решении использовался тот факт, что, с одной стороны, ежегодные потери электроэнергии в проводнике были обратно пропорциональны площади его сечения, а, с другой, прямо пропорционально площади сечения проводника увеличивалась стоимость его приобретения. Наличие двух разнонаправленных характеристик позволило найти точку экстремума и, соответственно, решить задачу.

Последовательность рассуждений Томсона была следующей ⁸: пусть A – площадь поперечного сечения проводника, s – удельное сопротивление (по объему) металла и c – сила передаваемого тока. Тогда энергия, преобразуемая в тепло и, таким образом, теряемая за секунду на сантиметр, составляет sc^2/A эрг.

Пусть p – пропорциональная доля времени, в течение которого на протяжении года в линии передается такой ток. Год составляет 31,5 млн сек., тогда годовая потеря энергии составляет:

$$\frac{31,5 \times 10^6 \cdot psc^2}{A} \text{ эрг} \quad (2)$$

Стоимость этого, если E – цена 1 эрг энергии, составляет:

$$\frac{31,5 \times 10^6 \cdot psc^2 \cdot E}{A} \quad (3)$$

Если V – стоимость одного кубического сантиметра металла проводника, то стоимость обладания им, на сантиметр длины провода, в расчете на 5 % годовых, составляет:

$$\frac{V \cdot A}{20} \quad (4)$$

Следовательно, все ежегодные затраты, включающие расходы на металлический проводник и стоимость потерь энергии, равны

$$\frac{V \cdot A}{20} + \frac{31,5 \times 10^6 \cdot psc^2 \cdot E}{A} \quad (5)$$

Значение A , делающее эту сумму минимальной (которое одновременно в этой точке уравнивает эти две составляющие общей суммы затрат), выглядит следующим образом ⁹:

$$A = \sqrt{\frac{31,5 \times 10^6 psc^2 E}{(V / 20)}} = \sqrt{\frac{63 \times 10^7 psc^2 E}{V}} \quad (6)$$

⁷ Белькинд Л. Д., Конфедератов И. Я., Шнейберг Я. А. История техники. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956. С. 327–330.

⁸ Thomson. On the Economy of Metal Conductors of Electricity... P. 527.

⁹ Ibid.



Рис. 2. Одна из первых российских линий электропередач. Москва, Лесная улица, 1912 г.

Последняя формула получена на основании производной от функции (5). Математически получилось так, что в этой точке (A) ежегодные затраты на владение проводником равны ежегодным потерям рассеиваемой энергии. Это равенство в зарубежной электротехнике называется законом Кельвина (*Kelvin's Law*): «Экономически обоснованная площадь сечения — это такая площадь, при которой ежегодные потери электроэнергии *равны* ежегодной стоимости владения проводника».

Томсон также указывал, что оптимальная экономически обоснованная площадь сечения проводника не зависит от расстояния, на которое передается электроэнергия, а зависит исключительно от следующих показателей:

- величины передаваемого тока;
- удельного сопротивления проводника;
- стоимости единицы передаваемой электроэнергии;
- стоимости проводника;
- действующей процентной ставкой владения проводником.

Под последним Томсон понимал сумму амортизационных затрат и затрат на проценты. В оригинале статьи им предложена ставка, равная 5 %.

С точки зрения развития инженерно-экономической науки огромное значение имеет формула (5). Фактически, это первое использование для расчетов формулы *приведенных затрат*.

$$C_i + E_n \times K_i \quad (7)$$

Действительно, в формуле (5) выражение $31,5 \cdot 10^6 \text{ psc}^2 E/A$ представляет собой текущие затраты C_i в выражении для приведенных затрат, IA — капитальные вложения K_i , а нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений E_n в формуле (5) составляет $1/20$.

Приведенный же в последней части доклада Томсона расчет величины сечения проводника для линии электропередачи от Ниагарского водопада дал значение площади сечения $1,26 \text{ см}^2$ (у Сименса (см. выше) диаметр — $7,5 \text{ см}^{10}$, т. е. ошибка больше чем в 44 раза!)¹¹. Так были заложены теоретические основы создания эффективных сетей передачи электроэнергии (рис. 2).

¹⁰ Белькинд, Конфедератов, Шнейберг. История техники... С. 328.

¹¹ Thomson. On the Economy of Metal Conductors of Electricity... P. 528.

Практически одновременно с Томсоном похожую проблему, но независимо и в совершенно другой отрасли промышленности, решал выдающийся русский инженер Владимир Григорьевич Шухов (1853–1939) (рис. 3).

Поступив вскоре после окончания в 1876 г. Императорского Московского технического училища (ныне Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана) на работу в первую в России инженерную фирму «Бари, Сытенко и Ко.», он в 1878 г. возглавил проект строительства первого российского нефтепровода, соединившего район добычи на Балаханском месторождении (Апшеронский полуостров) и нефтеперерабатывающие заводы Черного Города (в то время – восточные пригороды Баку)¹². Заказчиком работ было «Товарищества нефтяного производства братьев Нобель». Нефтепровод имел протяженность около 10 км и диаметр трубы



Рис. 3. Владимир Григорьевич Шухов

3 дюйма, т. е. 76,2 мм (рис. 4). В следующем 1879 г. под руководством Шухова в районе Баку, но уже для фирмы «Г. М. Лианозов и Ко.», был построен второй российский нефтепровод протяженностью около 12 км. Затем в 1880–1882 гг. по проектам Шухова на бакинских нефтепромыслах были построены еще три похожих по конструкции нефтепровода¹³. Полученные при проектировании и строительстве бакинских нефтепроводов опыт и знания Шухов обобщил в статье «Нефтепроводы», опубликованной в 1884 г.¹⁴ и существенно дополненной и переработанной в 1895 г.¹⁵

Поставив задачу проектирования наиболее выгодного нефтепровода, т. е. такого, который имеет наименьшие затраты как на строительство, так и на эксплуатацию, Шухов предложил решение, позволяющее

¹² Первый промышленный нефтепровод, по-видимому, был запущен 9 октября 1865 г. в штате Пенсильвания (США). Он шел от месторождения в районе г. Питхоул до железнодорожной станции Ойл-Крик. Сначала нефтепровод имел диаметр 2 дюйма (51 мм) и протяженность 8,9 км, его пропускная способность составляла 81 баррель в час (при 10 часовой работе). В дальнейшем мощность нефтепровода была увеличена до 2500 баррелей в сутки.

¹³ Шухов В. Г. (1853–1939). Искусство конструкции / Пер. с нем., ред. Р. Грефе, М. Гаппоев, О. Перчи. М.: Мир, 1995. С. 8, 116.

¹⁴ Шухов В. Г. Нефтепроводы // Вестник промышленности. 1884. № 7. С. 69–86.

¹⁵ Шухов В. Г. Трубопроводы и их применение к нефтяной промышленности. М.: Политехническое общество, состоящее при Императорском Техническом училище, 1895. Далее мы будем пользоваться изданием этой работы из книги: Шухов В. Г. Избранные труды. Гидротехника / Ред. А. Е. Шейндлин. М.: Наука, 1981. С. 159–211.



Рис. 4. Первый российский нефтепровод Балаханы – Черный Город, 1878 г.

по данному расстоянию и по количеству перекачиваемой жидкости определить размеры всех частей сооружения при том условии, чтобы ежегодные проценты с затраченного на устройство капитала, сложенные со стоимостью эксплуатации, составляли возможно меньшую величину¹⁶.

Или, несколько иначе,

по заданному расходу определить наивыгоднейшие для этого расхода диаметр проектируемого трубопровода и число станций (имеются в виду промежуточные насосные станции. – С. В., В. К.) для него¹⁷.

Для решения данной задачи Шуховым фактически был использован (впервые в российской практике) все тот же показатель приведенных затрат. И это именно так, хотя автором этот термин не использовался, его определение не давалось, а в предложенной им формуле непросто увидеть традиционное выражение для расчета приведенных затрат. Итоговая формула Шухова для расчета стоимости всех расходов по устройству и содержанию трубопровода, выраженной в весе металла труб, имела несколько иной вид (использовалась русская дореволюционная система мер):

$$Z = (A + \beta B) \frac{Q^3 L}{m^2 d^5} + \beta \frac{p}{m^2} \frac{Q^2 L^2}{(d^3 y)} + \beta q d L + C_y, \quad (8)$$

где Q – количество перекачиваемой жидкости; L – полная длина трубопровода; m – числовой коэффициент расхода, зависящий от природы

¹⁶ Шухов. Избранные труды. Гидротехника... С. 162.

¹⁷ Там же. С. 165.

жидкости, а для нефти – и от температуры; d – диаметр труб; y – число станций трубопровода; β – ежегодный процент, идущий на уплату процентов и погашение затраченного на все устройство капитала; p, q – коэффициенты в выражении для веса труб; A – коэффициент в выражении для расчета стоимости годового расхода топлива; B – коэффициент в выражении стоимости машин и котлов трубопровода; $C = \beta G + H$, где G – стоимость всех работ по оборудованию каждой станции трубопровода; H – ежегодные расходы на содержание каждой станции трубопровода (вознаграждение техническому персоналу).

Как писал Шухов, тот трубопровод будет наиболее выгодным, для которого стоимость Z будет наименьшей, и задача проектирования трубопровода сводится, следовательно, к определению условий, при которых Z будет минимальной¹⁸.

Формула Шухова может быть преобразована в соответствие с ныне принятой структурой приведенных затрат. В итоге, получим:

$$Z = A \frac{Q^3 L}{m^2 d^5} + Hy + \beta \left(B \frac{Q^3 L}{m^2 d^5} + \frac{pQ^2 L^2}{m^2 (d^3 y)} + qdL + Gy \right), \quad (9)$$

где $A \frac{Q^3 L}{m^2 d^5}$ – стоимость годового расхода топлива по всей линии трубопровода; Hy – ежегодные затраты на содержание всех станций трубопровода (вознаграждение служебного персонала); $B \frac{Q^3 L}{m^2 d^5}$ – стоимость насосных машин и котлов, служащих для перекачки жидкости; $\frac{pQ^2 L^2}{m^2 (d^3 y)} + qdL$ –

стоимость труб; Gy – стоимость всех работ по оборудованию всех станций трубопровода. Данная формула Шухова, по сути, отличается от современной формулы приведенных затрат только тем, что в ней вместо привычного нам нормативного коэффициента сравнительной эффективности капитальных вложений (E_n) присутствует ежегодный процент, идущий на уплату процентов и погашение затраченного на все устройство капитала (β).

Таким образом, двумя великими исследователями рубежа XIX–XX вв. были построены основы практического применения экономических характеристик при осуществлении инженерных расчетов, которые составили методический базис используемой почти до конца XX в. методики расчета приведенных затрат для определения сравнительной экономической эффективности различных вариантов инженерных и не только инженерных объектов. Заложенные Томсоном (Кельвином) и Шуховым экономические основы доказали свою жизнеспособность. Прекратилась эра расчета КПД в качестве единственного критерия технической целесообразности инженерных решений, при этом привлечение экономических параметров для

¹⁸ Там же.

поиска этих решений оптимизировали использование всех видов ресурсов и создали задел для дальнейших технологических прорывов в повсеместном использовании электроэнергии и нефти; которые без оговорок являются базисом современной мировой экономики. Вместе с тем в настоящее время использование приведенных затрат в расчетах практически везде вытеснено расчетом дисконтированных денежных потоков, что, по мнению авторов, не всегда оправдано и отрывает в ряде случаев поиск лучших инженерных решений от их экономической обоснованности. Однако подробное рассмотрение современного состояния технико-экономического анализа лежит за рамками настоящей статьи.

References

- Bel'kind, L. D., Konfederatov, I. Ia., and Shneiberg, Ia. A. (1953) *Istoriia tekhniki [The History of Technology]*. Moskva and Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo.
- Bel'kind, L. D., Veselovskii, O. N., Konfederatov, I. Ia., and Shneiberg, Ia. A. (1960) *Istoriia energeticheskoi tekhniki [The History of Power Technology]*. Moskva and Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo.
- Grefe, R., Gappoev, M., and Perchi, O. (Graefe, R., Gappoev, M., and Pertschi, O.) (eds.) (1995) *Shukhov, V. G. (1853–1939). Iskusstvo konstruktii [Shukhov, V. G. (1853–1939). The Art of Construction]*. Moskva: Mir.
- Shukhov, V. G. (1884) Nefteprovody [Oil Pipelines], *Vestnik promyshlennosti*, no. 7, pp. 69–86.
- Shukhov, V. G. (1895) *Truboprovody i ikh primenenie k neftianoi promyshlennosti [Pipelines and Their Use in Oil Industry]*. Moskva: Politekhnikheskoe obshchestvo, sostoiashee pri Imperatorskom tekhnicheskome uchilishche.
- Shukhov, V. G. (1981) *Izbrannye trudy. Gidrotekhnika [Selected Works. Hydraulic Engineering]*. Moskva: Nauka.
- Thomson, W. (1882) On the Economy of Metal Conductors of Electricity, *Report of the Fifty-First Meeting of the British Association for the Advancement of Science; Held at York in August and September 1881*. London: John Murray, pp. 526–528.
- Veselovskii, O. N. and Shneiberg, Ia. A. (1993) *Ocherki po istorii elektrotekhniki [The Essays on the History of Electrical Engineering]*. Moskva: Izdatel'stvo MEI.
- Vremennaia tipovaia metodika opredeleniia ekonomicheskoi effektivnosti kapital'nykh vlozhenii [The Provisional Standard Methodology for Calculating the Cost-Effectiveness of Investments] (1981), *Ekonomicheskaiia gazeta*, no. 2–3.