Вестник ЦЭМИ РАН. 2018-2023

ISSN 2658--3887

URL - <http://cemi.jes.su>

Все права защищены

Выпуск 3 Том 1. 2018

Влияние наработки и надежности машин на динамику их обесценения

Смоляк Сергей Абрамович

Центральный экономико-математический институт РАН

107564 Москва, Краснобогатyrская улица, 27 кв. 129

Аннотация

При стоимостной оценке машин и оборудования обычно требуется определять их «физический износ» (обесценение). В этих целях используют зависимости коэффициента или процента обесценения от возраста. Вид подобных зависимостей не всегда достаточно обоснован. Из-за этого стоимость достаточно старых по возрасту машин оказывается либо чрезмерно малой, либо сильно завышенной. Чтобы устранить указанный недостаток, в настоящей статье предлагается при построении зависимости коэффициента обесценения машин от возраста учитывать их наработку и надежность. Соответствующие математические модели опираются на общие принципы доходного подхода к стоимостной оценке: принцип ожидания выгод и принцип наиболее эффективного использования. Для каждого вида машин и оборудования калибровочные параметры модели могут быть подобраны по данным о рыночных ценах новых и подержанных машин.

Ключевые слова: машины, оборудование, техническое обслуживание, ремонт, рыночная стоимость, обесценение, доходный подход, принцип ожидания выгод, наиболее эффективное использование, надежность.

Дата публикации: 04.03.2019

Ссылка для цитирования:

Смоляк С. А. Влияние наработки и надежности машин на динамику их обесценения // Вестник ЦЭМИ РАН. – 2018. – Т. 1. – Выпуск 3.

URL: <https://cemi.jes.su/s265838870000190-2-1/>. DOI: 10.33276/S0000190-2-1

1. Общие сведения об оценке машин и их обесценения

Эта статья посвящена проблемам стоимостной оценки *машин* (этим термином мы охватываем также оборудование и транспортные средства). Мы будем рассматривать только машины одной и той же марки (модели, модификации). Такие машины в новом состоянии являются идентичными точными аналогами друг друга. Они продаются производителями или дилерами на *первичном* рынке примерно по одним и тем же ценам. На *вторичном* рынке продаются подержанные машины, которые сильно различаются по своему техническому состоянию и потому могут рассматриваться лишь как «неточные» аналоги друг друга. Машины, дальнейшее использование которых недопустимо или нецелесообразно, утилизируются (например, продаются «в лом» на *скраповом* рынке). Стоимость таких машин (утилизационная стоимость) относительно невелика и ее часто считают нулевой.

Оценка рыночной стоимости (далее – стоимости) машины обычно производится с применением затратного подхода. Для этого вначале по данным о ценах первичного рынка определяется стоимость машин оцениваемой марки в новом состоянии. После этого полученная стоимость корректируется с учетом состояния оцениваемой машины. Делается это одним из трех эквивалентных способов:

1. стоимость точного аналога уменьшается на сумму обесценения (depreciation, «физического износа»);
2. стоимость точного аналога уменьшается на процент обесценения;
3. стоимость точного аналога умножается на коэффициент годности (коэффициент относительной стоимости, дополнение коэффициента обесценения до 1).

Мы будем ориентироваться на принятый в США третий способ¹. В этом случае коэффициенты годности (или «физического износа») определяются обычно в зависимости от *возраста* машины по разного рода формулам (нередко результаты расчетов по таким формулам представляются в виде таблиц). Подобные методы оценки с определенной долей условности можно разбить на две группы: В методах *первой* группы задается «предельный» срок службы, по истечении которого машины данной марки выбывают из эксплуатации, а их стоимость становится равной утилизационной стоимости. В методах *второй* группы срок службы машин предполагается неограниченным, и при увеличении возраста стоимость машины стремится к утилизационной стоимости.

Типичным примером методов первой группы является линейный метод, при котором коэффициент обесценения меняется прямо пропорционально возрасту [2]. В этом методе:

$$K(t) = 1 - \frac{t}{T},$$

7

Где:

t – возраст машины,

$k(t)$ – коэффициент ее годности,

T – предельный срок ее службы (по достижении которого стоимость машины обращается в нуль).

8

Типичным методом *второй* группы является экспоненциальный, при котором с увеличением возраста стоимость машины снижается с постоянным темпом до нуля:

9

$$K(t) = e^{-at},$$

10

Где:

a – калибровочный параметр зависимости, отражающий темп снижения стоимости с возрастом.

11

Ряд других методов обеих групп будут упомянуты ниже, но вначале необходимо отметить их общие недостатки.

12

Для методов **первой** группы основная проблема состоит в установлении предельного возраста. В российской и зарубежной оценочной литературе для этого предлагаются разные способы. Например, предельным возрастом предлагается считать средние или устанавливаемые государством «нормативные» сроки службы машин (в РФ «нормативными» считаются амортизационные сроки службы, в

США они устанавливаются властями для оценки машин в целях налогообложения). Соответствующие формулы или таблицы дают удовлетворительные результаты при оценке машин не слишком большого возраста, но оказываются неприменимыми для оценки машин, возраст которых превышает предельный. Здесь приходится считать, что стоимость таких машин равна утилизационной (в некоторых штатах США это не так – у таких машин процент годности принимается равным некоторому установленному властями пределу, например, 20%). Между тем, возраст машин, представленных на вторичном рынке, колеблется в весьма широких пределах. Например, среди выставленных на продажу строительных машин значимую долю составляют машины, возраст которых превышает амортизационный срок службы в 2...4 раза, но которые находятся в хорошем техническом состоянии и имеют рыночную стоимость намного выше утилизационной. Казалось бы, учесть это обстоятельство можно, заложив в расчеты более высокий предельный срок службы. Однако анализ показывает, что при этом существенно завышается стоимость аналогичных машин небольшого (до 3...5 лет) возраста.

¹³ Методы **второй** группы не имеют указанного недостатка. В них коэффициент годности машин с возрастом уменьшается, приближаясь к определенному пределу. Имеются разные формулы для описания соответствующих зависимостей. При этом входящие в каждую из них калибровочные параметры можно подобрать так, чтобы расчетные значения коэффициентов годности согласовывались бы с данными о рыночных ценах машин разного возраста и с увеличением возраста приближались бы к относительной утилизационной стоимости (отношению утилизационной стоимости машины к стоимости ее точного аналога в новом состоянии).

¹⁴ Однако на первое место здесь выходит проблема обоснования вида зависимости коэффициентов годности машин от возраста. Дело в том, что никаких теорий, из которых такие зависимости можно было бы вывести, пока еще нет.

¹⁵ Некоторые оценщики считают, что обесценение машины (т.е. уменьшение стоимости машины по сравнению со стоимостью ее точного аналога в новом состоянии) протекает синхронно с процессом физического износа элементов машины. При этом, поскольку в процессе изнашивания геометрические размеры элементов машины меняются пропорционально времени, то и стоимость машины с возрастом должна уменьшаться по линейному закону. На самом деле в этих рассуждениях есть две ошибки. Во-первых, из того, что изменение геометрических размеров отдельных элементов машины (то, что технические специалисты называют «износом») пропорционально времени ее работы, не следует, что и стоимость машины в целом будет изменяться так же. Более того, неясно, можно ли вообще делать заключение о стоимости машины, ориентируясь только на техническое состояние всех ее элементов. Во-вторых, изменение геометрических размеров отдельных элементов машины вовсе не всегда происходит по линейному закону. Например, линейным законом описывается изменение размера деталей машин, подвергающихся сухому трению. Однако при трении скольжения и наличии смазочных материалов закон оказывается совершенно иным (так, в ряде работ он описывается степенной зависимостью от времени работы).

16 Поэтому для построения зависимости коэффициентов годности машин (k) от их возраста (t) необходимо специально вводить соответствующие допущения. Такие допущения обычно бывают двух типов.

17 Допущения **первого** типа относятся прямо к виду зависимости. Примерами служат допущения, что зависимость $k(t)$ является линейной или экспоненциальной или даже выражается многочленом шестой степени. Подтверждаются такие допущения только тем, что такая зависимость при специально подобранных значениях ее калибровочных параметров оказывается хорошо согласованной с наблюдаемыми в определенный период ценами машин некоторого вида. Будет ли она столь же хороша для оценки таких машин на другую дату или для оценки аналогичных машин другого вида, остается неясным. Нередко неясным остается и физический и экономический смысл самих калибровочных параметров.

18 Допущения **второго** типа относятся уже к технико-экономическим характеристикам машин. Такие допущения используются в сочетании с доходным подходом к оценке машин, и мы рассмотрим их в следующем разделе.

19 **2. Применение доходного подхода к оценке обесценения машин**

20 Согласно МСО 2017 [3], все методы доходного подхода основаны на **принципе ожидания выгод**, в соответствии с которым стоимость актива является единым выражением будущих денежных потоков от его полезного использования, приведенных к дате оценки (с применением коэффициентов дисконтирования, учитывающих факторы времени и риска). В этом разделе мы не будем учитывать влияния факторов риска, считая денежные потоки от использования активов детерминированными.

21 Однако даже в этом случае, особенно при практической оценке зданий и сооружений, пользоваться таким принципом затруднительно, ибо для этого необходим долгосрочный прогноз денежных потоков от использования актива. Поэтому здесь тот же принцип формулируют иначе:

22 **Стоимость актива на дату оценки равна сумме дисконтированных денежных потоков от использования актива в течение прогнозного периода (включая и стоимость актива в конце периода).**

23 Включение в сумму стоимости актива в конце периода (терминальной стоимости) при этом может трактоваться как денежный поток от продажи актива по рыночной стоимости.

24 В случае, если приносимые активом денежные потоки – случайные, здесь в расчет должна приниматься *ожидаемая* сумма денежных потоков (т.е. ее математическое ожидание). Поскольку неопределенность денежных потоков при этом учитывается при исчислении ожидаемой их суммы, дисконтирование должно производиться по безрисковой ставке.

25 Займемся теперь оценкой (рыночной) стоимости машин определенной марки разного возраста. Для этого потребуются ввести ряд допущений.:

- все машины данной марки при использовании их по назначению производят *одну и ту же работу* (товар, услугу), но могут различаться по своей производительности или затратам на выполнение этой работы;
- техническое состояние и стоимость машин однозначно определяются их возрастом;
- машины не подвергаются капитальным ремонтам;
- утилизационная стоимость машин равна нулю;
- машины имеют конечный предельный возраст T ;
- инфляция и налог на прибыль отсутствуют.

26 Введем следующие обозначения:

r – ставка дисконтирования (в непрерывном времени), 1/год;

$V(t)$ – стоимость машин, достигших на дату оценки возраста t лет;

$W(t)$ – их производительность (объем работ, выполняемых в единицу времени);

p – рыночная стоимость (на дату оценки) единицы объема выполняемых машинами работ;

$Z(t)$ интенсивность операционных затрат у таких машин (т.е. размер этих затрат⁴, осуществляемых в малую единицу времени).

27 Учитывая, что у машин большего возраста техническое состояние хуже, функцию $W(t)$ будем считать убывающей, а функцию $Z(t)$ – возрастающей.

28 Используя общую идею [5, 6], применим принцип ожидания выгод к машине, достигшей на дату оценки возраста t лет и прогнозируем периоду **малой длительности** dt , начинающемуся с даты оценки.

29 За период dt машина, используемая по назначению, выполнит объем работ $W(t)dt$, для чего потребуются затраты в размере $Z(t)dt$. Тогда денежный поток (чистый доход) от использования машины за период составит $pW(t)dt - Z(t)dt = [pW(t) - Z(t)]dt$. Это позволяет трактовать величину $F(t) = pW(t) - Z(t)$ как интенсивность генерируемого машинами возраста t лет денежного потока (чистого дохода). Обратим внимание, что в силу сделанных предположений с увеличением возраста t функция $F(t)$ убывает, так что, начиная с некоторого значения $t = T$ она становится отрицательной. Величина T – предельный возраст машин данной марки – будет корнем уравнения $F(T) = 0$. Согласно стандартам оценки [2], она может трактоваться как *срок полезного использования* машин, и тогда стоимость машин, возраст которых превышает T , будет нулевой.

30 Рассмотрим поэтому только случай, когда t

31 *В результате мы получаем (с точностью до малых более высокого порядка):*

$$32 \quad V(t) = F(t)dt + (1 - rdt)V(t + dt). \quad (1)$$

33 *Преобразуем это равенство с точностью до малых более высокого порядка следующим образом:*

$$0 = F(t)dt + (1 - rdt)V(t + dt) - V(t) = \\ = F(t)dt + (1 - rdt)[V(t) + V'(t)dt] - V(t) = [V'(t) - rV(t) + F(t)]dt.$$

Но такое равенство возможно только в случае, когда выражение в квадратной скобке будет равно нулю. Это значит, что функция $V(t)$ удовлетворяет уравнению:

$$V'(t) - rV(t) + F(t) = 0. \quad (2)$$

При этом стоимость машин возраста T лет равна нулю $V(T) = 0$. Решение полученного уравнения с этим дополнительным условием оказывается следующим:

$$V(t) = \int_t^T F(x)e^{-r(x-t)}dx, \quad (t \leq T). \quad (3)$$

Несколько более сложные рассуждения показывают, что эта формула останется в силе и при учете налога на прибыль и инфляции. Однако при этом ставка дисконтирования должна быть доналоговой номинальной за вычетом (непрерывного) темпа роста цен на машины данной марки (подробнее см. [3, 4]).

Если бы функция $F(t)$ была известна, по этой формуле можно было бы рассчитать стоимости машин любого возраста, в том числе и стоимость машины в новом состоянии $V(0)$, а затем и коэффициенты годности $k(t) = V(t)/V(0)$.

Однако обычно оценщики не располагают подробной информацией о производительности и операционных затратах машин разного возраста, поэтому приходится делать допущения о виде функции $F(t)$. Именно о допущениях такого рода говорилось в конце предыдущего раздела.

В оценочной литературе предлагалось использовать несколько подобных допущений.

Допущение 1. Функция $F(t)$ остается постоянной на протяжении всего срока полезного использования машины: $F(t) = F = \text{const}$. В этом случае из формулы (3) при t

$$V(t) = F \frac{1 - e^{-r(T-t)}}{r}; V(0) = F \frac{1 - e^{-rT}}{r}; k(t) = \frac{V(t)}{V(0)} = \frac{1 - e^{-r(T-t)}}{1 - e^{-rT}}.$$

Первую из этих формул можно представить в следующем виде:

$$V(t) = F \frac{1 - e^{-r(T-t)}}{r} = \frac{F}{r + \frac{r}{e^{r(T-t)} - 1}}.$$

⁴⁷ Она соответствует методу прямой капитализации чистых доходов [7]: знаменатель дроби здесь представляет собой коэффициент капитализации, являющейся суммой ставки дисконтирования и отвечающего этой ставке так называемого фактора фонда возмещения⁸.

⁴⁸ Обратим особое внимание на **нереалистичность** данного допущения. Машин, у которых с возрастом не меняется ни производительность, ни операционные затраты, и которые просто мгновенно становятся неработоспособными по достижении заданного возраста, просто не бывает⁹.

⁴⁹ **Допущение 2.** Функция $F(t)$ – линейная. Такое допущение, наряду с другими, несколько более общими, принималось в нашей книге [3]. Линейный вид зависимости отвечает, например, ситуации, когда производительность машины с возрастом линейно убывает, а операционные затраты – линейно возрастают.

⁵⁰ Обозначим через T срок службы машины. Тогда, как отмечалось выше, $F(T)=0$. Но любая неотрицательная линейная функция, удовлетворяющая этому условию, имеет вид: $F(t)=a(T-t)$, где $a>0$. В этом случае из формулы (3) при t

$$\begin{aligned} \text{⁵¹ } V(t) &= a \frac{r(T-t)-1+e^{-r(T-t)}}{r^2}; V(0) = a \frac{rT-1+e^{-rT}}{r^2}; \\ k(t) &= \frac{V(t)}{V(0)} = \frac{r(T-t)-1+e^{-r(T-t)}}{rT-1+e^{-rT}}. \end{aligned} \quad (4)$$

⁵² **Допущение 3.** В 1970 г. немецкий оценщик Мартин Тиман предложил в статье [¹⁰] новый метод оценки зданий, основанный, по существу, на изложенных выше положениях (к сожалению, автор ознакомился со статьей Тимана уже после написания книги [3]). При этом, основываясь на результатах своего анализа, Тиман принимал, что с возрастом приносимые зданием чистые доходы уменьшаются, и это уменьшение пропорционально квадрату возраста. Такому допущению отвечают функции, имеющие следующий вид: $F(t)=a(T^2-t^2)$. Мы не будем выписывать вытекающие отсюда и из формулы (3) достаточно сложные выражения для коэффициентов годности, отметим лишь, что Тиман рассчитал их численно и представил соответствующие таблицы, которыми немецкие оценщики пользовались длительное время. По нашему мнению, метод Тимана вполне пригоден и для оценки машин некоторых типов. Более того, он допускает и обобщения. Например, можно принять, что уменьшение приносимых активом чистых доходов пропорционально не квадрату, а какой-то иной степени возраста [3, 4, ¹¹, ¹²].

⁵³ *Анализируя рассмотренные выше методы определения коэффициентов годности, можно отметить три их существенных недостатка.*

⁵⁴ *Во-первых, в них, по существу, предполагается, что оцениваемые объекты не подвергаются капитальному ремонту (в противном случае приносимые объектом чистые доходы с возрастом уменьшались бы только в пределах одного межремонтного цикла, после чего скачкообразно увеличивались). Это – серьезный недостаток, однако исправить его без существенных усложнений расчетных формул пока не удастся. Именно по этой причине мы ограничиваемся рассмотрением машин, которые вообще не подвергаются капитальному ремонту (правда, получаемые результаты можно отнести и к таким ситуациям, когда капитальный ремонт машины лишь незначительно повышает приносимые ею чистые доходы по сравнению с теми, которые были до ремонта).*

⁵⁵ *Во-вторых, производительность машин и затраты на их эксплуатацию связываются в этих моделях с возрастом машин. Между тем, технические специалисты считают, что состояние машин в большей мере связано с их наработкой (временем работы).*

⁵⁶ *В-третьих, в этих моделях не учитывается случайный характер процесса эксплуатации машины и, в частности, возможность ее отказов. Два последних недостатка частично можно устранить, чему и будет посвящен следующий раздел статьи.*

⁵⁷ **3. Использование машин по времени и их отказы**

⁵⁸ *До сих пор мы считали, что после ввода в эксплуатацию и до момента утилизации машина используется по назначению. В данном разделе мы учтем, что какую-то часть этого времени машина работает (т.е. выполняет работу, для которой она предназначена), а остальное время – простаивает по различным причинам. Соответственно для описания состояния машины мы будем использовать два показателя – возраст (t) и наработку (s), т.е. – суммарное время работы машины от начала эксплуатации, выраженное в годах и долях года¹³. При этом основной характеристикой состояния машины мы будем считать ее (накопленную с начала использования) наработку (s).*

⁵⁹ *В процессе своего использования машина может подвергаться случайным отказам. Мы ограничимся двумя типами отказов: аварийными и фатальными. Аварийный отказ (поломка) приводит к необходимости проведения (аварийного) ремонта машин, который восстанавливает машину до того состояния, в котором машина находилась непосредственно перед отказом. При фатальном отказе дальнейшая эксплуатация машины становится невозможной, она должна утилизироваться и потому будет иметь нулевую стоимость.*

⁶⁰ *Как и принято в технической литературе, будем связывать с наработкой машины (s) ее технико-экономические показатели производительность $W(s)$ и интенсивность операционных затрат $Z(s)$. При этом будет подразумеваться, что эти характеристики относятся только ко времени работы машины. Другими словами, под $W(s)$ мы будем понимать «техническую»*

производительность машины с наработкой s , т.е. объем работы, выполненный за одну малую единицу ее наработки, а под $Z(s)$ – затраты на выполнение этой работы. В таком случае за малое время работы ds машина произведет работы в объеме $W(s)ds$ и затратит на это $Z(s)ds$. Чистый доход за период при этом составит $[pW(s)-Z(s)]ds$, где, как и раньше, p стоимость единицы выполняемых машиной работ.

⁶¹ Обратим внимание, что в процессе работы может допускаться брак (иногда определенный процент брака бывает технически неизбежным). При этом определение показателей $W(s)$ и $Z(s)$ потребуются уточнить. Выше мы говорили о машине с наработкой s , которая в следующем периоде отработала время ds . В такой ситуации время наработки ds будет включать и время некачественного выполнения работ, в объем выполненных за это время работ $W(s)ds$ войдут только качественно выполненные работы, а в затраты $Z(s)ds$ расходы на переделку исправимого брака и потери предприятия от неисправимого брака, допущенного в это время.

⁶² Поскольку основной характеристикой состояния машины является ее наработка, то и стоимость машины мы будем рассматривать как функцию $V(s)$ от ее наработки.

⁶³ Рассмотрим процесс использования машины в некотором периоде длительностью D часов (например, году или квартале), где не было фатальных отказов. С определенной долей условности в этом периоде можно выделить три составляющие.

1. время работы машины (D_w);
2. время проведения ей технического обслуживания и ремонта (D_r);
3. нерабочее время (D_n).

⁶⁴ Обратим внимание, что в таком случае в нерабочее время включаются выходные и праздничные дни, простой по метеорологическим условиям, внутрисменные простои, перебазировки строительных машин с одного объекта на другой. Кроме того, типичное использование машин предполагает их работу с определенной сменностью. Все остальные часы в рабочих сутках также включаются в нерабочее время. Так подсчитанное нерабочее время обычно составляет вполне определенную долю $g=D_n/D$ общего фонда, и эта доля не зависит от технического состояния машины (обычно $g = 0.4...0.7$).

⁶⁵ Иное положение с временем проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) бывают разных видов (например, ежедневное обслуживание, ТО-1, ТО-2, средний ремонт). Каждый вид плановых ТОиР предусматривает конкретный состав ремонтных работ и должен проводиться через определенное число часов наработки (см., например, [14, 15]). Для адекватного учета соответствующих графиков проведения ремонтных работ, необходимо разбивать срок службы машины на периоды продолжительностью не более суток. Однако можно обойтись и без такой детализации, отнеся к каждому периоду работы машины соответствующее время проведения ТОиР.

⁶⁶ Для этого на основе графиков ТОиР определяется вначале длительность межремонтного периода (от одного текущего или среднего ремонта до следующего) в часах наработки, а затем – время проведения всех плановых ТОиР за этот период. По этим данным можно рассчитать, сколько долей часа проведения плановых ТОиР приходится в среднем на один час наработки машины (обычно эта величина составляет 0.1...0.2). Далее, полученное соотношение надо скорректировать, отразив в нем и необходимость проведения текущих ремонтов при аварийных отказах машины. Здесь придется учесть, что таких отказов по мере увеличения наработки машины становится все больше и больше¹⁶. К тому же для устранения последствий одного аварийного отказа требуется больше времени, чем при плановом текущем ремонте.

⁶⁷ Учитывая указанные обстоятельства, введем зависящую от состояния машины (ее наработки, накопленной с начала использования) интенсивность затрат времени на ТОиР – функцию $h(s)$, отражающую долю суток проведения плановых и аварийных ТОиР машины в расчете на 1 сутки времени ее работы. Соответственно на следующий малый период ds наработки этой машины будет приходиться $h(s)ds$ единиц времени проведения ТОиР. Будем считать, что функция $h(s)$ – возрастающая.

⁶⁸ Как уже отмечалось, плановые и аварийные ТОиР – это самостоятельные работы, обращающиеся на рынке, и потому имеющие рыночную стоимость. Поскольку мы как бы распределили все ТОиР по отдельным часам наработки машины, то и стоимость этих работ придется распределять так же. При этом придется учесть, что у машин с большей наработкой аварийные отказы происходят чаще, а затраты на устранение последствий одного аварийного отказа больше, чем на проведение планового текущего ремонта (хотя бы из-за возникновения непредвиденных простоев и потерь на смежных стадиях производственного процесса предприятия). На этом основании мы примем, что для машины с наработкой s на следующий малый период ds ее наработки будут приходиться затраты на ТОиР в сумме $Q(s)ds$, причем функция $Q(s)$ – возрастающая.

⁶⁹ Из изложенного вытекает, что машина с наработкой s в следующем малом периоде ds ее наработки принесет чистый доход от выполнения работ в сумме $[pW(s)-Z(s)]ds$ и потребует затрат на ТОиР в сумме $Q(s)ds$. Таким образом, за этот период времени приносимый машиной чистый доход составит $[pW(s)-Z(s)-Q(s)]ds$. При этом функция $pW(s)-Z(s)-Q(s)$ будет убывающей. Более того, будем считать, что она убывает достаточно быстро и при достаточно больших s принимает отрицательные значения.

⁷⁰ В течение срока службы машины ее фатального отказа может и не произойти. Однако, чем хуже состояние машин (чем больше их наработка), тем выше вероятность их фатального отказа. Это позволяет связать интенсивность фатальных отказов с наработкой машины и обозначить через $m(s)$ интенсивность аварийных отказов машины с наработкой s . Другими словами, за время ds , ее работы фатальный отказ может произойти с вероятностью $m(s)ds$. Функция $m(s)$ при этом будет возрастающей.

71 Во многих работах по теории надежности принимается, что случайная наработка машин до отказа имеет распределение Релея с плотностью $p(s) = \frac{s}{\theta^2} e^{-\frac{s^2}{2\theta^2}}$, чему отвечает функция интенсивности отказов $\mu(s) = \frac{s}{\theta^2}$. Для этого распределения величина θ является модой (наиболее вероятным значением) наработки до отказа. При этом 80-процентной наработкой на отказ будет $R_{80} = 0.668\theta$, т.е. с вероятностью 80% отказ произойдет не раньше, чем через время 0.668θ . Средняя наработка на фатальный отказ при этом составит $\theta\sqrt{\pi/2} \approx 1.253\theta$.

72 4. Учет случайных отказов машин при определении коэффициентов их годности

73 Рассмотрим машину с наработкой s на дату оценки и малый период времени dt ее использования, предполагая, что утилизировать эту машину нецелесообразно, а за время ее работы не произойдет фатального отказа. В соответствии с изложенным выше, период dt можно разбить на три составляющие: время работы машины ds ; приходящееся на этот период время проведения ТОиР $h(s)ds$; время простоев gdt .

74 В таком случае $dt = ds + h(s)ds + \gamma dt$, и поэтому

$$75 \quad \frac{dt}{ds} = g(s), \quad \text{где } g(s) = \frac{1 + h(s)}{1 - \gamma}. \quad (5)$$

76 Применим теперь принцип ожидания выгод к рассматриваемой машине и периоду dt ее использования.

77 Для этого заметим, что с вероятностью $m(s)ds$ в этом периоде возможен фатальный отказ машины, после чего ее стоимость становится нулевой.

78 Если же отказа не произойдет (а это случится с дополнительной вероятностью $1 - m(s)ds$), то за период dt машина, как отмечалось выше, принесет чистый доход $F(s)ds$, где

$$79 \quad F(s) = pW(s) - Z(s) - Q(s). \quad (6)$$

80 Кроме того, в конце периода наработка машины увеличится на ds , и составит $s + ds$. Машина с такой наработкой на дату оценки имела бы стоимость $V(s + ds)$. Но, в силу отсутствия инфляции, такую же стоимость будет иметь и наша машина в конце периода, т.е. через время dt . В расчетах к этой стоимости надо применить коэффициент дисконтирования, который, как и ранее, можно считать примерно равным $1 - rdt$.

81 Согласно принципу ожидания выгод, стоимость машины на дату оценки равна ожидаемой сумме дисконтированных чистых доходов от ее использования, т.е. (с точностью до малых более высокого порядка):

82

$$V(s) = [1 - \mu(s)ds] \{F(s)ds + (1 - rdt)V(s + ds)\}.$$

83 Преобразуем правую часть этого равенства, используя равенство (5) и пренебрегая малыми более высокого порядка:

84

$$\begin{aligned} V(s) &= [1 - \mu(s)ds] \{F(s)ds + (1 - rdt)V(s + ds)\} = \\ &= F(s)ds + [1 - \mu(s)ds][1 - rg(s)ds][V(s) + V'(s)ds] = \\ &= V(s) + \{V'(s) - [\mu(s) + rg(s)]V(s) + F(s)\}ds. \end{aligned}$$

85 Такое равенство возможно только тогда, когда функция $V(s)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению:

86
$$V'(s) - [\mu(s) + rg(s)]V(s) + F(s) = 0. \quad (7)$$

87 Заметим теперь, что машину, приносящую отрицательные чистые доходы, эксплуатировать нецелесообразно. Поэтому существует такая **предельная наработка** (предельный ресурс) S , при достижении которой стоимость машины становится нулевой: $V(S) = 0$, а при меньшей наработке выполняется равенство (7).

88 В принципе, соотношений (5)(7) достаточно, чтобы получить аналитические выражения для стоимости машин разной наработки и возраста. Однако решение задачи существенно упрощается, если считать зависимости $h(s)$ и $m(s)$ линейными:

89

$$h(s) = h_0 + h_1 s; \quad \mu(s) = \mu_0 + \mu_1 s.$$

90 Легко видеть, что тогда $g(s)$ и $m(s) + rg(s)$ будут линейными возрастающими функциями от s , которые можно представить в таком виде:

91

$$g(s) = \alpha + \beta s; \quad \mu(s) + rg(s) = (\mu_0 + r\alpha) + (\mu_1 + r\beta)s = \rho + \tau s,$$

92

где:

93

$$\alpha = \frac{1 + h_0}{1 - \gamma}; \quad \beta = \frac{h_1}{1 - \gamma}; \quad \mu_0 = 0; \quad \mu_1 = \frac{1}{\theta^2}; \quad \rho = \mu_0 + r\alpha; \quad \tau = \mu_1 + r\beta.$$

94

Тогда уравнения (5) и (7) можно записать проще:

$$\frac{dt}{ds} = \alpha + \beta s; \quad (8)$$

$$V'(s) - (\rho + \tau s)V(s) + F(s) = 0. \quad (9)$$

Обратим внимание, что новые параметры здесь имеют простой экономический смысл.

Величина α отражает отношение времени использования машины в новом состоянии ко времени ее работы (обратная величина может трактоваться как коэффициент использования такой машины по времени), а β как скорость роста этого отношения при увеличении наработки. При этом α будет тем больше, чем меньше коэффициент использования машины в новом состоянии по времени, а β тем больше, чем быстрее снижается этот коэффициент по мере увеличения наработки машины.

Сумму $\rho + \tau s$, если сравнить уравнения (9) и (2), здесь можно трактовать как (меняющуюся при изменении состояния машины) ставку дисконтирования, учитывающую риск фатальных отказов.

Обратим внимание, что при $\beta = \tau = 0$ коэффициент использования машины по времени машины всегда будет постоянным, а интенсивность фатальных отказов не будет зависеть от состояния машины. Если, к тому же, интенсивность приносимых машиной чистых доходов будет линейной функцией времени, то мы приходим к ситуации, рассмотренной в разделе 2, при которой коэффициенты годности определяются формулой (4).

Учтем теперь, что интенсивность приносимых машиной чистых доходов положительна только при сравнительно малой ее наработке, и обращается в нуль при достижении предельной наработки S . Но тогда и стоимость машины оказывается нулевой. Решение системы уравнений (8)(9) с краевыми условиями $t(0)=0$, $V(S)=0$ оказывается следующим:

$$t = \alpha s + \beta s^2 / 2; \quad (10)$$

$$V(s) = \int_s^S F(x) e^{\rho(s-x) + \tau(s^2 - x^2)/2} dx. \quad (11)$$

Стоимость машины, определяемую равенством (11), можно трактовать как сумму дисконтированных чистых доходов от последующей эксплуатации машины. Однако суммирование при этом идет только по периодам работы машины, а ставка дисконтирования будет расти с увеличением наработки.

Из (11) можно получить и выражение для стоимости машин в новом состоянии:

$$V(0) = \int_0^S F(x) e^{-\rho x - \alpha x^2 / 2} dx. \quad (12)$$

Разделив (12) на (13), можно получить и выражение для коэффициентов годности $k(s) = V(s)/V(0)$.

Более наглядно полученную зависимость можно представить как функцию от возраста, а не от наработки, для чего можно воспользоваться

равенством (11).

109 Учтем теперь, что рациональному использованию машины отвечает наибольшая ее стоимость. Это относится и к такой характеристике машины, как предельная наработка S . Приравняв к нулю производную правой части (11) по S , мы увидим, что стоимости всех машин данной марки будут наибольшими, только если $F(S)=0$. Поскольку, согласно сделанным ранее предположениям, функция $F(s)$ убывает и принимает отрицательные значения, она обязательно обращается в нуль и притом в единственной точке S .

110 До сих пор мы считали, что утилизационная стоимость машины $U=0$. На самом деле это не так. При $U \neq 0$ решение уравнения (9) с краевым условием $V(S)=U$ можно записать в следующей форме:

$$111 \quad V(s) = \int_s^S [F(x) - (\rho + \tau x)U] e^{\rho(s-x) + \tau(s^2-x^2)/2} dx + U. \quad (13)$$

112 Предельная наработка S , при которой стоимости машин оказываются наибольшими, будет в этом случае определяться из равенства:

$$113 \quad F(S) = (\rho + \tau S)U. \quad (14)$$

114 Это уравнение также имеет единственный корень, причем с увеличением утилизационной стоимости машины ее предельная наработка убывает. Объясняется это тем, что при большой утилизационной стоимости машину, приносящую малые чистые доходы выгоднее утилизировать, чем продолжать использовать.

115 О том, как меняются с возрастом или наработкой затраты на эксплуатацию машин и их производительность, известно мало. Наиболее реалистичным представляется допущение, что эти характеристики вначале ухудшаются довольно быстро, но затем начинают приближаться к некоторому предельному уровню. Этому допущению отвечает экспоненциальная модель, предложенная нами в [3, 4]:

116

$$F(s) = A \left[e^{-\omega s} - e^{-\omega S} \right] + (\rho + \tau s)U.$$

117 В этом случае интегралы в формулах (11)(13) выражаются через функцию F стандартного нормального распределения. Формула (13) при этом принимает вид:

$$118 \quad V(s) = A \sqrt{\frac{2\pi}{\tau}} \left\{ e^{\frac{z^2}{2} - \omega s} [\Phi(Z) - \Phi(z)] - e^{\frac{y^2}{2} - \omega S} [\Phi(Y) - \Phi(y)] \right\} + U,$$

где $Y = S\sqrt{\tau} + \frac{\rho}{\sqrt{\tau}}, \quad y = s\sqrt{\tau} + \frac{\rho}{\sqrt{\tau}}, \quad Z = Y + \frac{\omega}{\sqrt{\tau}}, \quad z = y + \frac{\omega}{\sqrt{\tau}}. \quad (15)$

119 Отсюда находим и стоимость машин в новом состоянии:

$$V(0) = A \sqrt{\frac{2\pi}{\tau}} \left\{ e^{\frac{z^2}{2}} \left[\Phi(Z) - \Phi\left(\frac{\rho + \omega}{\sqrt{\tau}}\right) \right] - e^{\frac{y^2}{2} - \omega S} \left[\Phi(Y) - \Phi\left(\frac{\rho}{\sqrt{\tau}}\right) \right] \right\} + U. \quad (16)$$

Воспользуемся теперь тем обстоятельством, что обычно утилизационные стоимости машин зависят от их стоимости в новом состоянии. Более стабильными являются показатели относительной утилизационной стоимости $u = U/V(0)$. Обычно они лежат в пределах от 0.04 до 0.08, хотя могут достигать и 0.2. Если подставить теперь $U = uV(0)$ в равенство (16), из полученного равенства можно выразить $V(0)$ через A :

$$V(0) = \frac{A}{1-u} \sqrt{\frac{2\pi}{\tau}} \left\{ e^{\frac{z^2}{2}} \left[\Phi(Z) - \Phi\left(\frac{\rho + \omega}{\sqrt{\tau}}\right) \right] - e^{\frac{y^2}{2} - \omega S} \left[\Phi(Y) - \Phi\left(\frac{\rho}{\sqrt{\tau}}\right) \right] \right\}. \quad (17)$$

Отсюда и из равенства (15) можно получить следующее выражение для коэффициентов годности, не зависящее от коэффициента A :

$$k(s) = (1-u) \frac{e^{\frac{z^2}{2} - \omega S} [\Phi(Z) - \Phi(z)] - e^{\frac{y^2}{2} - \omega S} [\Phi(Y) - \Phi(y)]}{e^{\frac{z^2}{2}} [\Phi(Z) - \Phi\left(\frac{\rho + \omega}{\sqrt{\tau}}\right)] - e^{\frac{y^2}{2} - \omega S} [\Phi(Y) - \Phi\left(\frac{\rho}{\sqrt{\tau}}\right)]} + u. \quad (18)$$

Конечно, полученную зависимость можно представить и на графике, однако более наглядным будет представление коэффициентов годности как функции от возраста, а не от наработки, для чего можно воспользоваться равенством (11).

5. Экспериментальные расчеты

По изложенной модели были проведены расчеты применительно к одноковшовому экскаватору ЭО 2621 и бульдозеру Б10М.

В связи с отсутствием ряда данных по этим машинам в качестве исходных, кроме показателей r , h_0 , g , были приняты следующие показатели:

- T_{80} – возраст машин, отвечающий 80-процентной наработке на фатальный отказ R_{80} (этот возраст был принят близким к нормативным (установленным) срокам службы машин);
- i_h – интенсивность затрат времени на ТОиР у машин в возрасте T_{80} по сравнению с машинами в новом состоянии;
- i_S – отношение предельной наработки машин (S) к 80-процентной наработке на фатальный отказ R_{80} ;

Исходные данные и расчетные показатели по этим маркам машин приведены в следующей таблице.

Машины	r	T_{80}	h_0	i_h	i_S	g	m_0	u
Б10М	0.1	8.00	0.173	1.5	3.5	0.351	0	0.0
ЭО2621	0.1	9.00	0.222	1.5	3.5	0.34	0	0.1
Расчетные показатели								
Машины	q	m_1	h_1	R_{80}	S	a	b	r

Б10М	6.174	0.026	0.0203	4.27	14.95	1.807	0.031	0.1
ЭО2621	6.671	0.022	0.0239	4.65	16.27	1.852	0.036	0.1

¹³¹ На рис. 1 приведены полученные зависимости коэффициентов годности от возраста.

¹³²

Рис. 1. Зависимость коэффициентов годности машин от возраста

¹³³ Отметим, что при подобранных значениях w зависимости коэффициентов годности машин от возраста хорошо согласуются с фактическими данными о ценах машин соответствующих марок разного возраста. Кроме того, предельные возраста машин, отвечающие их предельной наработке, составляют для Б10М и ЭО2621 соответственно 30 и 35 лет, что немного больше максимальных возрастов таких машин, выставленных на продажу.

Примечания:

1. Оценщики в США используют не коэффициенты, а проценты годности (Percent Good Factor, PGF), дополняющие проценты обесценения до 100.

2. . Вейг Н.В. Оценка машин и оборудования: Учебное пособие. –СПб. Изд-во СПбГУЭФ. 2009. 124 с.

3. . Международные стандарты оценки 2017 / пер. с англ. М.: Российское общество оценщиков. 2017. 168 с.

4. Как и принимается при формировании доналоговых денежных потоков при оценке имущества, в состав операционных затрат не включаются ни налог на прибыль, ни амортизационные отчисления.

5. . Смоляк С.А. Проблемы и парадоксы оценки машин и оборудования. М.: РИО МАОК. 2008. 305 с.

6. . СМОЛЯК С.А. Стоимостная оценка машин и оборудования (секреты метода ДДП). М.: ООО «Издательский дом Опцион». 2016. 376 с.

7. . Асаул А.Н. Оценка собственности. Оценка машин, оборудования и транспортных средств / А. Н. Асаул (ред.), В. Н. Старинский, А. Г. Бездудная, М. К. Старовойтов. СПб.: АНО «ИПЭВ». 2011. 287 с.

8. Правда, если оценщики используют годовые чистые доходы и годовую ставку дисконтирования, то в данную формулу входят интенсивность чистых доходов и непрерывная ставка дисконтирования.

9. В англоязычной литературе подобные объекты называют *one-hoss shay*, имея в виду одноконный фаэтон из поэмы Оливера Холмса, который все время оставался в одном состоянии, но мгновенно рассыпался на мелкие части ровно через 100 лет. Русскоязычным аналогом здесь может служить карета Золушки.

10. . *Tiemann, M. Reformvorschläge zum Ertrags- und Sachwertverfahren, in: Allgemeine Vermessungsnachrichten, 1970.*

11. . *Смоляк С.А. Оценка износа зданий: модель Тимана и ее обобщения. Часть 1 // Имущественные отношения в Российской Федерации, № 12 (147), 2013, с.6-20.*

12. . *Смоляк С.А. Оценка износа зданий: модель Тимана и ее обобщения. Часть 2 // Имущественные отношения в Российской Федерации, № 1 (148), 2014, с. 25-35.*

13. *Обычно наработку машин измеряют в часах. Мы принимаем, что 1 год наработки равен 8760 часов.*

14. . *МДС 12-13.2003. Годовые режимы работы строительных машин.*

15. . *Яцура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования. М.: НЦ ЭНАС. 2006. 360 с.*

16. *Более того, снижение надежности наблюдается даже у машин, производительность и операционные затраты которых поддерживаются на стабильном уровне. Не случайно, скажем, авиационные двигатели направляют в капитальный ремонт через определенное количество часов работы. Если бы интенсивность их отказов не зависела от наработки, в этом не было бы никакого смысла (грубо говоря, двигатель отказывал бы с одинаковой вероятностью как после часа работы, так и после 5000 часов).*

Библиография:

1. *Вейг Н.В. Оценка машин и оборудования: Учебное пособие. –СПб. Изд-во СПбГУЭФ. 2009. 124 с.*

2. *Международные стандарты оценки 2017 / пер. с англ. М.: Российское общество оценщиков. 2017. 168 с.*

3. *Смоляк С.А. Проблемы и парадоксы оценки машин и оборудования. М.: РИО МАОК. 2008. 305 с.*

4. *Смоляк С.А. Стоимостная оценка машин и оборудования (секреты метода ДДП). М.: ООО «Издательский дом Опцион». 2016. 376 с.*

5. *Асаул А.Н. Оценка собственности. Оценка машин, оборудования и транспортных средств / А. Н. Асаул (ред.), В. Н. Старинский, А. Г. Бездудная, М. К. Старовойтов. СПб.: АНО «ИПЭВ». 2011. 287 с.*

6. *Tiemann, M. Reformvorschläge zum Ertrags- und Sachwertverfahren, in: Allgemeine Vermessungsnachrichten, 1970.*

7. *Смоляк С.А. Оценка износа зданий: модель Тимана и ее обобщения. Часть 1 // Имущественные отношения в Российской Федерации, № 12 (147), 2013, с.6-20.*

8. *Смоляк С.А. Оценка износа зданий: модель Тимана и ее обобщения. Часть 2 // Имущественные отношения в Российской Федерации, № 1 (148), 2014, с. 25-35.*

9. *МДС 12-13.2003. Годовые режимы работы строительных машин.*

10. *Яцура А.И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования. М.: НЦ ЭНАС. 2006. 360 с.*

Impact of operating time and reliability of machines on the dynamics of their impairment

Sergey Smolyak

CEMI RAS

107564 MOSCOW Russia, Krasnobogatyrskaya ul., d.27, kv. 129

Abstract

In the valuation of machinery and equipment, it is usually necessary to determine their "wear and tear" (impairment). For this purpose, the ratio or percentage of impairment is used as a function of age. The type of such dependencies is not always sufficiently justified. Because of this, the cost of a fairly old age cars is either too small or too high. To resolve this drawback, in the present article it is proposed for construction of the dependence of the coefficient of depreciation of machinery from the age of to consider their life and reliability. The corresponding mathematical models are based on the General principles of the income approach to valuation: the principle of expectation of benefits and the principle of the most effective use. For each type of machinery and equipment calibration parameters of the model can be selected according to the market prices of new and used machines.

Keywords: *machinery, equipment, maintenance, repair, market value, impairment, income approach, the principle of expectation of benefits, the most efficient use, reliability.*

Date of publication: 04.03.2019

Citation link:

Smolyak S. Impact of operating time and reliability of machines on the dynamics of their impairment // Herald of CEMI. – 2018. – V. 1. – Issue 3.

URL: <https://cemi.jes.su/s265838870000190-2-1/>. DOI: 10.33276/S0000190-2-1