

Влияние физического износа машин на динамику их рыночной стоимости

© 2019 г. С.А. Смоляк

ЦЭМИ РАН, Москва

E-mail: smolyak1@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

Статья подготовлена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-010-99666).

При стоимостной оценке машин и оборудования обычно требуется определять их физический износ (обесценение). В этих целях используют зависимости коэффициента (или процента) их обесценения от возраста. Вид подобных зависимостей не всегда достаточно обоснован. Из-за этого стоимость старых по возрасту машин оказывается либо чрезмерно малой, либо сильно завышенной. Чтобы устранить указанный недостаток, в настоящей статье предлагается учесть влияние наработки машин на процесс их физического изнашивания. При этом производительность машин, интенсивность их отказов, затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт, а также характеристики использования машины по времени связываются не с возрастом, а с наработкой машины. Для оценки рыночной стоимости машины мы используем метод дисконтирования денежных потоков. Чтобы избежать субъективизма при долгосрочном прогнозировании денежных потоков, мы применяем принцип ожидания выгод применительно к малому прогнозному периоду и объединяем его с принципом наиболее эффективного использования. В результате он принимает следующую форму: стоимость актива на дату оценки не превышает математического ожидания суммы дисконтированных денежных потоков от его использования в течение малого периода (включая и стоимость актива в конце периода) и совпадает с этим математическим ожиданием, если актив используется наиболее эффективным способом. Математическая модель, основанная на этом принципе, позволяет получить расчетные формулы для рыночной стоимости машины. Для каждого вида машин и оборудования калибровочные параметры модели могут быть подобраны по данным об основных характеристиках и рыночных ценах новых и подержанных машин. Применение построенной модели к двум видам строительных машин показывает, что полученные результаты хорошо согласуются с данными о рыночных ценах таких машин разного возраста.

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

Классификация JEL: C61, D24, D46, D81, M41.

DOI: 10.31857/S042473880005785-2

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОЦЕНКЕ МАШИН

Эта статья посвящена одной из проблем стоимостной оценки машин, оборудования и транспортных средств (далее — машин). Стоимостная оценка (valuation) машин и других активов осуществляется оценщиками с различными целями. Общие положения и принципы стоимостной оценки, а также требования к оценщикам отражены в МСО 2017¹ и различных национальных стандартах оценки² (в России — Федеральных стандартах).

В общем случае стоимость актива отражает **суждение** оценщика либо о возможной цене этого актива в (гипотетической) сделке его купли/продажи, совершаемой на определенную дату (**дату оценки**) при определенных условиях и допущениях, либо об экономических выгодах от владения

¹ International Valuation Standards 2017. International Valuation Standards Council.

² Почти все стандарты оценки периодически пересматриваются, порой весьма кардинально. В данной статье мы ориентируемся на версию “Международных стандартов оценки 2017 года” (МСО 2017).

этим активом. У каждого актива имеется много разных видов стоимостей, но основным видом стоимости является **рыночная** (market value). Далее речь пойдет о некоторых проблемах ее оценки. Рыночная стоимость (далее — стоимость) актива выражает цену (гипотетической) сделки, совершаемой с ним на дату оценки и удовлетворяющей следующим требованиям:

- сделка совершается на *открытом и конкурентном рынке* (МСО 2017, МСО 104, п. 30.3);
- сделка является *коммерческой*. Это означает, что стороны не связаны между собой какими-либо отношениями и каждая из сторон действует независимо (там же, п. 30.2f);
- покупатель *заинтересован* и действует *расчетливо*. Это означает, что у него есть мотивы купить, но ничто его к этому не принуждает. Такой покупатель не горит желанием купить и не настроен платить любую цену. Он совершает покупку, действуя в соответствии с реалиями и ожиданиями текущего рынка, и не станет платить цену выше той, которую требует рынок. Нынешний собственник актива также входит в число тех, кто составляет этот рынок (там же, п. 30.2d);
- продавец *заинтересован* и действует *расчетливо*. Это означает, что он не горит желанием продать, не понуждается к продаже и не готов продать по любой цене или настаивать на цене, которая не считается разумной на рынке в данный момент. Мотивом заинтересованного продавца является продажа актива на рыночных условиях по максимально возможной цене на открытом рынке после проведения надлежащего маркетинга, какой бы ни была эта цена. Фактическое положение реального собственника актива во внимание не принимается, так как “заинтересованный продавец” — это гипотетический собственник (там же, п. 30.2e);
- продавец и покупатель являются *хорошо осведомленными*. Это означает, что они в достаточной степени информированы о характере и свойствах продаваемого актива, его фактическом и потенциальном использовании, а также о состоянии рынка на дату оценки (там же, п. 30.2h);
- перед сделкой был проведен *надлежащий маркетинг*. Это означает, что актив был выставлен на рынке наиболее подходящим образом, чтобы обеспечить его реализацию по наилучшей из достижимых, по разумным соображениям, цен. Метод продажи должен подразумеваться таким, который обеспечивает получение наилучшей цены на рынке, к которому у продавца имеется доступ (там же, п. 30.2g).

Сделку, удовлетворяющую этим (указанным в стандартах оценки) требованиям, будем для краткости называть *стандартной*. Такими будут многие, но не все сделки на открытом и конкурентном рынке. Поэтому цены таких сделок колеблются вокруг рыночной стоимости, а участников этих сделок можно рассматривать как *типичных участников* рынка. Наоборот, цены сделок, в которых эти требования существенно нарушаются, будут резко отличаться от рыночной стоимости. Это позволяет дать сокращенное определение типичным участникам рынка и понятию рыночной стоимости.

Под *типичными участниками* рынка понимаются участники, которые ведут себя расчетливо, проводят надлежащий маркетинг и хорошо осведомлены о характере, свойствах и способах использования актива, а также о состоянии рынка на дату оценки.

Под **рыночной стоимостью** актива понимается расчетная денежная сумма, за которую состоялся бы обмен актива на дату оценки между типичным покупателем и продавцом в результате стандартной сделки.

Особо важно отметить, что в соответствии с МСО 2017, МСО 104 рыночная стоимость актива отражает его *наиболее эффективное использование*, т.е. отвечает такому способу использования актива, при котором его стоимость будет наибольшей. Очевидно, что такое требование отвечает условиям рыночного равновесия (баланса спроса и предложения).

Объектами нашего рассмотрения будут 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) при изменении рыночной конъюнктуры меняется. Более стабильными являются показатели относительной утилизационной стоимости — отношения утилизационной стоимости машины к стоимости машины той же марки в новом состоянии на ту же дату оценки. Эти показатели невелики и обычно составляют 0,04—0,10, хотя могут достигать и 0,2. Поэтому нередко утилизационную стоимость машин считают нулевой.

Оценка стоимости машины обычно производится с применением так называемого затратного подхода. Для этого вначале по данным о ценах первичного рынка определяется стоимость ее точного аналога — машины 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 (физический износ);
- 2) стоимость точного аналога уменьшается на процент обесценения;
- 3) стоимость точного аналога умножается на процент годности (процент относительной стоимости, дополнение процента обесценения до 100).

Мы будем ориентироваться на принятый в США третий способ с той лишь разницей, что вместо процентов годности (Percent Good Factor, PGF) мы будем использовать коэффициенты годности. На практике коэффициенты или проценты годности определяются с использованием данных о ценах вторичного рынка по разного рода формулам обычно в зависимости от *возраста* машины, причем нередко результаты расчетов по таким формулам представляются в виде таблиц — типа приведенных в (Assessors' Handbook 581, 2018). Важно отметить, что при изменении рыночной конъюнктуры стоимости машин обычно меняются, порой довольно значимо, тогда как коэффициенты годности практически не меняются — это можно увидеть, сравнив, например, таблицы (Assessors' Handbook 581, 2018) с аналогичными таблицами прежних лет.

Аналитические или табличные зависимости коэффициентов годности k от возраста t можно разделить на две группы. В зависимостях первой группы задается конечный срок службы (предельный возраст) T машин данной марки, по истечении которого они выбывают из эксплуатации, тогда как зависимости второй группы исходят из того, что эти машины могут эффективно использоваться в любом возрасте.

Типичным примером зависимостей *первой* группы является линейная, при которой коэффициент обесценения меняется прямо пропорционально возрасту (Вейг, 2009): $k(t) = 1 - t/T$. Аналогичная зависимость используется и при линейном методе начисления амортизации в бухгалтерском учете.

Типичным методом *второй* группы является экспоненциальный, при котором с увеличением возраста стоимость машины снижается с постоянным темпом до нуля. Здесь $k(t) = e^{-\alpha t}$, где α — калибровочный параметр зависимости, отражающий темп снижения стоимости с возрастом. Экспоненциальным является и метод ускоренной амортизации, также применяемый в бухгалтерском учете. К этой же группе, по сути, относится и предложенная автором модель переходного процесса (Смоляк, 2014а, 2016). Своеобразная комбинация линейного и экспоненциального метода предложена в (Лейфер, Кашникова, 2008).

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

Для методов *первой* группы основная проблема состоит в установлении срока службы (предельного возраста). В российской и зарубежной оценочной литературе для этого предлагаются разные способы. Например, предельными 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. А при оценке машин, возраст которых превышает предельный, приходится считать, что стоимость таких машин равна утилизационной. Между тем, возраст машин, представ-

ленных на вторичном рынке, бывает весьма значительным. Так, у значимой доли выставленных на продажу строительных машин возраст превышает амортизационный срок службы в 2—4 раза, а их рыночная стоимость намного выше утилизационной. Казалось бы, учесть это обстоятельство можно повысив закладываемый в расчеты срок службы. Однако такой прием приводит к существенному завышению стоимости аналогичных машин небольшого (до 3—5 лет) возраста.

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).

Однако при этом возникает проблема обоснования вида зависимости коэффициентов годности машин от их возраста. Дело в том, что пока еще нет никаких теорий, из которых такие зависимости можно было бы вывести.

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. К тому же, представляется неправомерным оценивать уменьшение стоимости машины, ориентируясь только на техническое состояние всех ее элементов. Во-вторых, изменение геометрических размеров отдельных элементов машины отнюдь 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).

Поэтому для построения зависимости коэффициентов годности машин k от их возраста t необходимо специально вводить соответствующие допущения, прямо или косвенно определяющие спецификацию зависимости. Выше приводились соответствующие примеры, в которых зависимость $k(t)$ принималась линейной или экспоненциальной.

Однако большинство моделей, основанных на таких допущениях, имеют, помимо выше указанных, следующие недостатки.

1. Эти модели слабо увязаны с имеющимися данными об изменении технических характеристик машин (производительность, расход топлива, затраты на ремонт) в процессе их эксплуатации.
2. Стоимость машин рассматривается как функция от их возраста, тогда как в технической литературе и работах по теории надежности характеристики машин связываются с их наработкой.
3. Не в полной мере учитывается требование наиболее эффективного использования машин.
4. Не учитывается случайный характер процесса использования машины, и прежде всего возможность ее отказов.

В настоящей статье делается попытка частичного устранения этих недостатков.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ДОХОДНОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ОБЕСЦЕНЕНИЯ МАШИН

Согласно МСО 2017 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). Как правило, денежные потоки от использования активов оценщики принимают детерминированными, а их неопределенность учитывают при выборе ставки дисконтирования (МСО 2017, МСО 105, пп. 50.17, 50.31). Однако даже при таком упрощении использовать принцип ожидания выгод практически затруднительно, поскольку это требует долгосрочного прогноза денежных потоков от использования актива. Поэтому обычно потоки прогнозируют на не слишком большой период, а дисконтированную сумму последующих потоков заменяют стоимостью актива в конце периода (что может трактоваться как денежный поток от продажи актива по рыночной стоимости). В результате принцип ожидания выгод принимает следующую форму, широко используемую оценщиками: *стоимость актива на дату оценки равна сумме дисконтированных денежных потоков от его использования в течение прогнозного периода (включая и стоимость актива в конце периода)*.

Между тем, такая формулировка требует важного дополнения. Оно связано с тем, что денежные потоки от использования актива существенно зависят от *способа использования* актива. А при оценке рыночной стоимости необходимо, как отмечалось выше, исходить из того (наиболее эффективного) способа использования актива, при котором его стоимость будет наибольшей. На этом основании правильнее было бы сформулировать принцип ожидания выгод иначе: *стоимость актива на дату оценки не превышает суммы дисконтированных денежных потоков от его использования в течение прогнозного периода (включая и стоимость актива в конце периода) и совпадает с этой суммой, если актив используется наиболее эффективным способом*.

В случае если приносимые активом денежные потоки — случайные, то здесь в расчет должна быть принята *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.

Наиболее простая экономико-математическая модель для стоимостной оценки машин основана на следующих допущениях:

- машины данной марки используются по назначению единственным (рациональным) способом. При этом все они производят *одну и ту же работу* (товар, услугу), но могут различаться по производительности или затратам на выполнение этой работы;
- техническое состояние, характеристики машин и их стоимость однозначно определяются их возрастом;
- машины не подвергаются капитальным ремонтам;
- утилизационная стоимость машин равна нулю;
- машины имеют конечный предельный возраст T .

Будем считать, что инфляция и налог на прибыль отсутствуют (к тому же стандарты оценки допускают использование реальных доналоговых денежных потоков, не учитывающих влияния этих факторов).

Введем следующие обозначения: $V(t)$ — 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; $C(t)$ — интенсивность операционных затрат у таких машин; r — ставка дисконтирования (в непрерывном времени³), 1/год.

Обратим внимание, что в процессе работы может допускаться брак (подчас определенный процент брака бывает технически неизбежным). Поэтому далее мы будем подразумевать, что производительность машины определяется объемом качественно выполненных работ, а операционные затраты включают расходы на переделку исправимого брака и потери владельца машины от неисправимого брака, допущенного во время работы.

³ Обычно оценщики используют годовую ставку дисконтирования и годовые денежные потоки, но мы рассматриваем процесс использования машин в непрерывном времени.

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

Заметим теперь, что использовать по назначению машины достаточно большого возраста неэффективно, их целесообразно утилизировать. Поэтому существует некоторый предельный возраст T такой, что использовать машину по назначению эффективно только если ее возраст меньше T , в противном же случае она подлежит утилизации и, стало быть, имеет нулевую стоимость.

Рассмотрим теперь на дату оценки машину, возраст t которой меньше предельного. Если использовать ее по назначению в течение периода времени dt , она выполнит объем работ $W(t)dt$, для чего потребуются затраты в размере $C(t)dt$. Тогда денежный поток (чистый доход) от использования машины за период составит $pW(t)dt - C(t)dt = [pW(t) - C(t)]dt$. Это позволяет трактовать величину $F(t) = pW(t) - C(t)$ как интенсивность генерируемого машинами возраста t лет денежного потока (чистого дохода). При этом в силу сделанных предположений функция $F(t)$ будет убывающей.

Теперь, используя общую идею (Смоляк, 2008, 2009, 2016), применим принцип ожидания выгод к нашей машине и прогнозируем периоду длительности dt , начинающемуся с даты оценки.

К концу периода dt возраст машины изменится и станет равным $t + dt$. Поскольку инфляция отсутствует, то стоимость машины в конце периода будет точно такой же, как у машины возраста $t + dt$ лет на дату оценки, т.е. $V(t + dt)$. При дисконтировании эту стоимость надо умножить на соответствующий коэффициент, который в данном случае будет равен $e^{-rdt} \approx 1 - rdt$. Тогда в силу принципа ожидания выгод мы получаем (с точностью до малых более высокого порядка):

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

Отсюда с точностью до малых более высокого порядка имеем:

$$\begin{aligned} 0 &= F(t)dt + (1 - rdt)V(t + dt) - V(t) = \\ &= F(t)dt + (1 - rdt)[V(t) + V'(t)dt] - V(t) = [V'(t) - rV(t) + F(t)]dt. \end{aligned}$$

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

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

При этом стоимость машин возраста T лет равна нулю: $V(T) = 0$. Решением уравнения (2) с этим краевым условием будет:

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

Учтем теперь, что при стоимостной оценке машины должны использоваться наиболее эффективно. Это относится не только к технологии выполнения работ, но и к такой характеристике их использования, как *предельный возраст*. Легко проверить, что значение T , при котором стоимости машин (3) будут максимальными, удовлетворяет уравнению $F(T) = 0$. В силу сделанных предположений это уравнение имеет единственный корень. Согласно МСО 2017 он может трактоваться как *срок полезного использования* машин.

Несколько более сложные рассуждения показывают, что полученные результаты останутся в силе и при учете налога на прибыль и инфляции. Однако, как показано в (Смоляк, 2008, 2016), при этом *ставка дисконтирования должна определяться как разность доналоговой номинальной ставки и темпа роста цен на машины данной марки*.

Если бы функция $F(t)$ была известна, по формуле (3) 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 имеют подробной информации о производительности и операционных затратах машин разного возраста, поэтому о виде функции $F(t)$ они делают те или иные допущения, на что указывалось 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 (T): $F(t) = F = \text{const}$. В этом случае из формулы (3) при $t < T$ имеем:

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

Первую из этих формул можно представить в виде:

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

Она соответствует методу прямой капитализации чистых доходов (Асаул и др., 2011): знаменатель дроби здесь представляет собой коэффициент капитализации, являющийся суммой ставки дисконтирования и отвечающего этой ставке так называемого фактора фонда возмещения⁴.

Обратим особое внимание на **нереалистичность** данного допущения. Машин, у которых с возрастом не меняется ни производительность, ни операционные затраты и которые мгновенно становятся неработоспособными по достижении заданного возраста, просто не бывает⁵.

Допущение 2. Функция $F(t)$ — линейная (это отвечает, например, ситуации, когда производительность машины с возрастом линейно убывает, а операционные затраты — линейно возрастают). Такое допущение, наряду с другими, несколько более общими, было принято в (Смоляк, 2008).

Выше отмечалось, что в конце срока службы интенсивность приносимых машиной чистых доходов должна быть нулевой: $F(T) = 0$. Такое равенство для линейной убывающей функции $F(t)$ возможно, только если она имеет вид: $F(t) = a(1 - t/T)$, где $a > 0$. Подставив это выражение для $F(t)$ в формулу (3) и вычислив полученный интеграл, получаем при $t < T$:

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

$$k(t) = \frac{V(t)}{V(0)} = \frac{r(T-t) - 1 + e^{-r(T-t)}}{rT - 1 + e^{-rT}}. \quad (4)$$

Допущение 3. В 1970 г. немецкий оценщик Мартин Тиман предложил в (Tiemann, 1970) новый метод оценки зданий, основанный по существу на изложенных выше положениях. При этом, основываясь на результатах своего анализа, Тиман принял, что с возрастом приносимые зданием чистые доходы уменьшаются и это уменьшение пропорционально *квадрату* возраста. Такому допущению отвечают функции вида $F(t) = a[1 - (t/T)^2]$.

Отсюда и из формулы (3) можно получить достаточно сложные выражения для коэффициентов годности. Мы не будем их выписывать, отсылая читателей к (Смоляк, 2008, 2013, 2014а, 2016). Отметим лишь, что Тиман рассчитал эти коэффициенты численно и представил соответствующие таблицы, которыми немецкие оценщики пользовались длительное время. По нашему мнению, метод Тимана вполне пригоден и для оценки машин некоторых типов.

Допущение 4. При допущениях 2 и 3 машины с одинаковым сроком службы имеют одну и ту же динамику изменения чистых доходов с возрастом. Между тем есть машины, у которых (при нормальной эксплуатации) характеристики с возрастом ухудшаются вначале незначительно, но затем все быстрее и быстрее. Есть и другие машины, у которых поведение характеристик обратное — они

⁴ Обычно оценщики используют годовые чистые доходы и годовую ставку дисконтирования, но в данную формулу входят интенсивность чистых доходов и непрерывная ставка дисконтирования.

⁵ 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.

вначале ухудшаются сравнительно быстро, но затем все медленнее и медленнее. Поэтому в общем случае функция $F(t)$ должна включать какие-то калибровочные параметры, отражающие характер ее динамики. В (Смоляк, 2008) было предложено экспоненциальное семейство таких функций:

$$F(t) = \frac{A(1 - e^{-\omega(T-t)})}{1 - e^{-\omega T}}, \quad (t < T). \quad (5)$$

Положительным значениям параметра ω отвечают машины второго из указанных выше типов, отрицательным — машины первого из этих типов. Соответствующая достаточно сложная формула для коэффициентов годности приводится в (Смоляк, 2008; Смоляк, 2016). Отметим лишь, что при $\omega \rightarrow \infty$ динамика коэффициентов годности будет такой же, как и при допущении 1, а при $\omega \rightarrow 0$ — такой же, как и при допущении 2.

Напомним теперь, что при рассмотренных допущениях утилизационная стоимость машин предполагалась нулевой. В общем же случае, как вытекает из (Смоляк, 2008, 2016), коэффициенты годности $k_u(t)$, учитывающие влияние утилизационной стоимости машины, следует рассчитывать по формуле:

$$k_u(t) = (1 - u)k(t) + u, \quad (6)$$

где $k(t)$ — коэффициент годности, определенный без учета утилизационной стоимости машины, u — относительная утилизационная стоимость машины (отношение ее утилизационной стоимости к стоимости машины той же марки в новом состоянии).

В следующих разделах мы покажем, что общую идею изложенной модели можно использовать и в случае, когда основные характеристики машины определяются не возрастом машины, а ее наработкой.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИН ПО ВРЕМЕНИ И ИХ ОТКАЗЫ

До сих пор неявно предполагалось, что машины рассматриваемой марки после ввода в эксплуатацию и до момента утилизации работают. В данном разделе мы учтем, что в процессе использования машина может:

- *работать* (выполнять работу, для которой она предназначена);
- проходить техническое обслуживание и ремонт (ТОиР). При этом предполагается, что ремонты не являются капитальными (правда, получаемые результаты можно отнести и к таким ситуациям, когда стоимость капитального ремонта невелика);
- *простаивать* по другим причинам. Сюда включаются, в частности, выходные и праздничные дни, простои по метеорологическим условиям и время перемещения строительной машины с одного объекта на другой. Если типичное использование машин предполагает их работу с определенной сменностью, то к простоям относятся и все остальные часы в рабочих сутках.

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 года (обычно наработку машин измеряют в часах). Основной характеристикой состояния машины мы будем считать ее наработку (s), так что технико-экономические показатели машины и ее стоимость будут рассматриваться как функции наработки. При построении соответствующей модели мы опираемся на результаты, изложенные в (Смоляк, 2014б, 2014в).

В процессе использования машина может подвергаться случайным *отказам*. Мы ограничимся двумя типами отказа: фатальным и аварийным. При фатальном (в технической литературе — ресурсном) отказе дальнейшая эксплуатация машины становится невозможной, она должна быть утилизирована, так что ее стоимость должна быть нулевой. Аварийный отказ (поломка) приводит к необходимости проведения (аварийного) ремонта машин, и мы принимаем, что такой ремонт

восстанавливает машину до того состояния, в котором машина находилась непосредственно перед отказом.

Рассмотрим процесс использования машины в некотором периоде длительностью D часов (например, квартале), где не было фатальных отказов. Пусть D_w — время работы машины в этом периоде, D_r — время проведения ей технического обслуживания и ремонта (ТОиР), D_n — время простоя машины по другим причинам.

Как правило, время простоев машины составляет вполне определенную (не зависящую от состояния) долю $\delta = D_n/D$ во времени ее использования (обычно $\delta = 0,4 \div 0,7$).

Иное положение — с временем проведения технического обслуживания и ремонта. ТОиР бывают разных видов. Каждый вид плановых ТОиР предусматривает конкретный состав ремонтных работ, и он должен проводиться через определенное число часов наработки. Нормативы периодичности таких работ приводятся, например, в МДС 12-13.2003⁶ и (Ящура, 2006). При стоимостной оценке машин процесс их использования в течение всего срока службы описывается укрупненно, поэтому адекватно учесть здесь соответствующие графики проведения ремонтных работ невозможно. Однако на протяжении каждого календарного года службы складывается определенное (в каждом году — свое) среднее соотношение между временем работы машины и временем пребывания ее в ТОиР. Это позволяет (с определенной долей условности) отнести к каждому периоду работы машины соответствующее время проведения плановых и аварийных ТОиР.

Это позволяет ввести в рассмотрение показатель *удельной продолжительности ТОиР* — функцию $h(s)$, отражающую отношение D_r/D_w — среднего времени проведения ТОиР к ее наработке за малый период D использования машины. Так, если в некотором периоде машина отработала 10 суток, а на ее ТОиР в этом периоде потребовалось 1,5 суток, то $h = 0,15$. В соответствии с данным определением, если за малый период времени наработка машины увеличилась с s до $s + ds$, то на этот период будет приходиться $h(s)ds$ единиц времени проведения ТОиР.

Поскольку по мере физического изнашивания машины ТОиР приходится производить чаще, то функцию $h(s)$ будем считать возрастающей.

Поскольку мы как бы распределили все ТОиР — это самостоятельные работы, обращающиеся на рынке и потому имеющие рыночную стоимость. Поскольку мы распределили бы все ТОиР по отдельным часам наработки машины, то и стоимость этих работ придется распределять так же. Поэтому затраты на ТОиР, связанные с работой машины в указанном периоде, можно представить как $Q(s)ds$, где $Q(s)$ — интенсивность затрат на ТОиР машины. Но у машин с большей наработкой аварийные отказы случаются чаще⁷, а затраты на устранение последствий аварийного отказа выше, чем на проведение планового текущего ремонта (хотя бы из-за возникновения непредвиденных простоев и потерь на смежных стадиях производственного процесса). На этом основании функцию $Q(s)$ будем считать возрастающей.

За весь срок службы машины фатального отказа может и не произойти. Однако чем хуже состояние машин (чем больше их наработка), тем выше вероятность их фатального отказа. Это позволяет рассматривать интенсивность фатальных отказов как возрастающую функцию $\mu(s)$ от ее (накопленной с начала использования) наработки. При этом за время ds ее работы фатальный отказ может произойти с вероятностью $\mu(s)ds$.

В теории надежности нередко принимается, что случайная наработка машин до отказа имеет распределение Рэлея с плотностью $p(s) = \frac{s}{\theta^2} \exp\{-s^2 / 2\theta^2\}$, где θ — параметр масштаба. При этом распределении интенсивность отказов будет прямо пропорциональна наработке машины:

⁶ МДС 12-13.2003 “Методическая документация в строительстве. Механизация строительства. Годовые режимы работы строительных машин”.

⁷ С увеличением наработки машины снижается ее надежность. Это имеет место даже у машин, производительность и операционные затраты которых поддерживаются на стабильном уровне. Не случайно, например, авиационные двигатели направляют в капитальный ремонт через определенное число часов работы. Если бы интенсивность их отказов не зависела от наработки, в этом не было бы никакого смысла (в целом, двигатель отказывал бы с одинаковой вероятностью как после часа работы, так и после 5000 часов).

$\mu(s) = s/\theta^2$, средняя наработка до отказа составит $\theta\sqrt{\pi/2} \approx 1,253\theta$, а модальная (наиболее вероятная) — θ . Надежность объектов обычно характеризуют γ -процентной наработкой (ресурсом) R_γ , т.е. наработкой, в течение которой отказ не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах (ГОСТ 27.002.89⁸). Для распределения Рэлея $R_\gamma = \theta\sqrt{2\ln(100/\gamma)}$. Нормативные, назначенные и амортизационные сроки службы машин, к долговечности которых не предъявляется особых требований, обычно принимаются близкими к их 80%-ной наработке на фатальный отказ $R_{80} \approx 0,668\theta$ (Лейфер, 2015; Лейфер, Кашникова, 2008).

4. УЧЕТ СЛУЧАЙНЫХ ОТКАЗОВ МАШИН ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИХ ГОДНОСТИ

Поскольку основной характеристикой состояния машины мы считаем ее наработку, то все ее характеристики мы будем рассматривать как функции от ее наработки s . Стоимость машины будем обозначать через $V(s)$. Даже если машина работает без отказов, ее состояние все время ухудшается, так что при достижении некоторой предельной наработки (предельного ресурса) S наиболее эффективным будет утилизировать ее, а стоимость машины оказывается нулевой: $V(S) = 0$.

Рассмотрим на дату оценки машину с (накопленной с начала эксплуатации) наработкой s , не превышающей предельную, и малый период времени dt ее использования. В этом периоде с вероятностью $\mu(s)ds$ возможен фатальный отказ машины, так что выгоды от дальнейшего использования машины становятся нулевыми.

С дополнительной вероятностью $1 - \mu(s)ds$ отказа не будет. Тогда разделим период dt на три составляющие:

- время работы машины ds ;
- приходящееся на этот период время проведения ТОиР $h(s)ds$;
- время простоев δdt .

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

$$\frac{dt}{ds} = g(s), \quad g(s) = \frac{1+h(s)}{1-\delta}. \quad (7)$$

Величина $g(s)$ при этом отражает календарное время, приходящееся на единицу наработки машины, а обратная величина является коэффициентом (экстенсивного) использования машины по времени (КИМВ) — отношением времени работы машины за период dt к длительности этого периода.

Оценим теперь чистый доход, приносимый данной машиной за период dt . При этом ее основные характеристики будут рассматриваться как функции состояния машины, т.е. ее наработки s . Пусть $W(s)$ — техническая производительность машины, т.е. объем работ, выполненных за одну малую единицу ее наработки, p — стоимость единицы работы, $Z(s)$ — интенсивность затрат на выполнение работ, $Q(s)$ — интенсивность затрат на ТОиР машины (сумма величин $Z(s)$ и $Q(s)$ будет совпадать с интенсивностью операционных затрат).

В таком случае за период dt будет произведено $W(s)ds$ единиц работы общей стоимостью $pW(s)ds$, непосредственно на их выполнение будет затрачена сумма $Z(s)ds$, а на проведение планового и непланового ТОиР израсходовано $Q(s)ds$. Чистый доход от использования машины при этом составит $pW(s)ds - Z(s)ds - Q(s)ds = F(s)ds$, где

$$F(s) = pW(s) - Z(s) - Q(s) - \quad (8)$$

интенсивность чистых доходов.

Как говорилось выше, с ростом (накопленной) наработки техническая производительность машины $W(s)$ убывает, а функции $Z(s)$, $Q(s)$ и $h(s)$ возрастают. При этом функции $g(s)$ и $F(s)$ будут убывающими.

⁸ ГОСТ 27.002.89: Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

Таким образом, за период dt машина принесет чистый доход $F(s)ds$. 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 . Поэтому дисконтированные выгоды от ее продажи составят $(1 - rdt)V(s + ds)$, где r — ставка дисконтирования.

Применим теперь принцип ожидания выгод к рассматриваемой машине и периоду dt ее использования. Мы получим (с точностью до малых более высокого порядка):

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

Преобразуем правую часть этого равенства, используя равенство (7) и пренебрегая малыми более высокого порядка:

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

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

$$V'(s) - [\mu(s) + rg(s)]V(s) + F(s) = 0. \quad (9)$$

Заметим, что сравнение этого равенства с (2) позволяет трактовать входящую в (9) сумму в квадратных скобках как (зависящую от состояния машины) ставку дисконтирования, учитывающую риск фатальных отказов. Используя прием, предложенный в (Смоляк, 2016), можно показать, что равенство (9) сохранится и в условиях инфляции, если принять ставку дисконтирования r равной номинальной доналоговой, уменьшенной на темп роста цен на машины данной марки.

Напомним, что уравнение (9) было получено только для машин с наработкой, не превышающих предельную S , причем $V(S) = 0$.

В принципе, полученных соотношений достаточно, чтобы найти аналитические выражения для стоимости машин разной наработки и возраста. Однако формулы упрощаются, если считать, что наработка машин до отказа имеет распределение Релея, т.е. $\mu(s) = s/\theta^2$, а удельная продолжительность ТОиР — линейная функция (накопленной) наработки: $h(s) = h_0 + h_1s$. При этом величина h_0 отражает интенсивность затрат времени на плановые и неплановые ТОиР у машины в новом состоянии, h_1 — прирост этой интенсивности на каждую единицу наработки машины.

Поскольку функции $h(s) = h_0 + h_1s$ и $\mu(s)$ — линейные и возрастающие, то такими же будут и функции $g(s) = [1 + h(s)]/(1 - \delta)$ и $\mu(s) + rg(s)$. Их можно представить в виде

$$g(s) = \alpha + \beta s; \quad \mu(s) + rg(s) = r\alpha + (1/\theta^2 + r\beta)s = \rho + \tau s,$$

где

$$\alpha = \frac{1 + h_0}{1 - \delta}; \quad \beta = \frac{h_1}{1 - \delta}; \quad \rho = r\alpha; \quad \tau = \frac{1}{\theta^2} + r\beta. \quad (10)$$

Тогда уравнения (7) и (9) можно записать проще:

$$\frac{dt}{ds} = \alpha + \beta s; \quad (11)$$

$$V'(s) - (\rho + \tau s)V(s) + F(s) = 0. \quad (12)$$

Обратим внимание, что новые параметры здесь имеют простой экономический смысл. Отношение dt/ds отражает, грубо говоря, количество часов *использования* машины, приходящееся на 1 час ее *наработки*, а обратное отношение ds/dt можно трактовать как коэффициент использования

машины по времени (КИМВ). Поэтому α будет величиной, обратной к КИМВ у машины в новом состоянии, а β отразит скорость роста этой величины при увеличении наработки.

Отметим также, что при $\beta = \tau = 0$ значение КИМВ у машин в любом состоянии будет одним и тем же, а фатальных отказов не будет вообще. Если к тому же интенсивность приносимых машиной чистых доходов будет линейной функцией времени, то возникнет ситуация, рассмотренная в разд. 2, при которой коэффициенты годности определяются формулой (4).

Учтем теперь, что уравнения (11)–(12) справедливы только при $s < S$, причем $V(S) = 0$. К тому же в начале эксплуатации $t(0) = 0$. Решение уравнений (11)–(12) с этими краевыми условиями оказывается следующим:

$$t = \alpha s + 0,5 \beta s^2; \quad (13)$$

$$V(s) = \int_s^S F(x) \exp\{\rho(s-x) + 0,5\tau(s^2-x^2)\} dx. \quad (14)$$

Полученные равенства (13) и (14) связывают возраст (t) и стоимость (V) рационально используемой машины с ее наработкой⁹ (s).

Из (14) сразу же получаются выражения для стоимости машин в новом состоянии и для коэффициентов годности:

$$V(0) = \int_0^S F(x) \exp\{-\rho x - 0,5\tau x^2\} dx. \quad (15)$$

$$k(s) = \frac{V(s)}{V(0)} = \frac{\int_s^S F(x) \exp\{\rho(s-x) + 0,5\tau(s^2-x^2)\} dx}{\int_0^S F(x) \exp\{-\rho x - 0,5\tau x^2\} dx}. \quad (16)$$

Из (16) следует, что для определения коэффициентов годности не обязательно знать *величину чистых доходов*, приносимых машинами в разных состояниях, достаточно знать лишь *динамику* их изменения, т.е. индексы изменения интенсивности чистых доходов $J(s) = F(s)/F(0)$ у машин в разных состояниях. Другими словами, для этого в формулу (16) вместо интенсивности чистых доходов $F(s)$ достаточно подставлять соответствующие индексы $J(s)$.

Учтем теперь, что наиболее эффективному использованию машины отвечает наибольшая ее стоимость. Это относится и к такой характеристике машины, как предельная наработка S . Приравняв к нулю производную правой части (14) по S , мы увидим, что стоимости всех машин данной марки будут наибольшими, только если $F(S) = 0$. Поскольку, согласно сделанным ранее предположениям, интенсивность чистых доходов $F(s)$ или индекс ее изменения $J(s)$ убывает и принимает отрицательные значения, они обязательно обращаются в нуль, и притом в единственной точке S .

Конкретные зависимости производительности машин и затрат на их эксплуатацию от возраста или наработки изучены плохо. Приводимые в литературе соответствующие сведения в основном опираются на данные обследования небольшого числа машин конкретных марок, работающих в определенных технологических и экономических условиях и в других странах. Тем не менее можно считать, что характеристики машин вначале ухудшаются довольно быстро, но затем начинают приближаться к некоторому предельному уровню. Такому допущению отвечает экспоненциальная модель, в которой динамика интенсивности чистых доходов описывается формулой (5):

$$J(s) = \frac{e^{-\omega s} - e^{-\omega S}}{1 - e^{-\omega S}}. \quad (17)$$

⁹ На первый взгляд, стоимость машины, определяемую формулой (14), можно трактовать как сумму дисконтированных (по меняющейся с наработкой ставке дисконтирования $\rho + \tau s$) чистых доходов от ее работы *после даты оценки* до достижения предельного состояния. На самом деле в формулу входят чистые доходы, приносимые *на дату оценки* машинами той же марки с большей накопленной наработкой.

В этом случае интегралы в формулах (14)—(16) выражаются через функцию Φ стандартного нормального распределения. Формула (16) при этом принимает вид:

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

где

$$Y = S\sqrt{\tau} + \frac{\rho}{\sqrt{\tau}}, \quad y = s\sqrt{\tau} + \frac{\rho}{\sqrt{\tau}}, \quad Z = Y + \frac{\omega}{\sqrt{\tau}}, \quad z = y + \frac{\omega}{\sqrt{\tau}}. \quad (19)$$

Напомним, что полученная зависимость (18) относится лишь к частному случаю нулевой утилизационной стоимости машины. Более сложные выкладки показывают, что коэффициенты годности, учитывающие утилизационную стоимость машины, надо вначале рассчитать по формуле (18), а затем скорректировать по формуле (6).

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 исходные данные для расчетов устанавливались следующим образом:

1) ставка дисконтирования $r = 0,04$ принята исходя из бескупонной доходности ОФЗ (по G -кривой для дюрации 30 лет) и прогнозного темпа роста цен на машины;

2) относительная утилизационная стоимость машин u принималась по отрывочным данным о ценах продажи машин в лом;

3) доля δ времени простоев в общем фонде календарного времени определялась на основе данных (МДС 12—13.2003) о годовых режимах работы машин;

4) удельная продолжительность ТОиР u машины в новом состоянии h_0 рассчитана как отношение дней плановых ТОиР к дням пребывания машины в работе и ТОиР согласно (МДС 12—13.2003);

5) хронологический возраст T_{80} , отвечающий 80%-ной наработке на фатальный отказ R_{80} , принимался близким к нормативным (амортизационным) срокам службы машин;

6) 80%-ная наработка на фатальный отказ R_{80} определялась из уравнения (13): $T_{80} = \alpha R_{80} + 0,5\beta R_{80}^2$;

7) модальная наработка на фатальный отказ θ определялась из соотношения $R_{80} = 0,668\theta$, справедливое для распределения Рэлея;

8) предельная наработка S определялась по формуле $S = I_S R_{80}$, где I_S — соотношение предельной наработки и 80%-ной наработки на фатальный отказ. Учитывая, что в эксплуатации находится много строительных машин, предельный ресурс которых продлевался два-три раза, отношение I_S предельной наработки к 80%-ной должно быть не меньше 3. В данном расчете принималось $I_S = 3,5$;

9) для определения скорости роста удельной продолжительности ТОиР (h_1) задавался коэффициент I_h ее увеличения к моменту достижения 80%-ной наработки на фатальный отказ R_{80} . Тогда h_1 определялось по формуле: $h_1 = h_0(I_h - 1)/R_{80}$. По имеющейся выборочной информации об использовании строительных машин по времени, к концу нормативного срока службы (т.е. в возрасте T_{80}) удельные затраты времени на ТОиР в два-три раза возрастают по сравнению с машинами в новом состоянии. На этом основании в данном расчете принималось $I_h = 2,5$;

10) параметры α , β , ρ и τ определялись по формулам (10);

11) для расчета коэффициентов годности по формуле (16) индексы изменения приносимых машиной чистых доходов $J(s)$ определялись по формуле (17);

12) значение ω подбиралось так, чтобы получаемые значения коэффициентов годности возможно лучше согласовывались с рыночными ценами соответствующих машин разного возраста.

Полученные значения основных характеристик машин сведены в таблицу.

Таблица

Машины	δ	u	T_{80}	R_{80}	θ	I_S	S	T
Б10М	0,384	0,07	8,00	4,11	6,16	3,5	14,39	33,0
ЭО2621	0,375	0,11	9,00	4,48	6,71	3,5	15,68	38,4
Машины	I_h	h_0	h_1	α	β	ρ	τ	ω
Б10М	2,5	0,114	0,0415	1,807	0,067	0,072	0,0291	0,180
ЭО2621	2,5	0,146	0,0488	1,834	0,078	0,073	0,0254	0,138

По предложенной модели рассчитаны коэффициенты годности машин и выявлено влияние их наработки на режим работы. Как отмечалось выше, с увеличением (накопленной) наработки машин s растет удельная продолжительность ТОиР $h(s)$ и снижается коэффициент использования машин по времени $\text{КИМВ} = 1/g(s)$. Для большей наглядности значения коэффициентов годности, удельной продолжительности ТОиР и КИМВ представлены на рис. 1–3 в зависимости от возраста t , а не наработки машины (s), для чего использовалась формула (13).

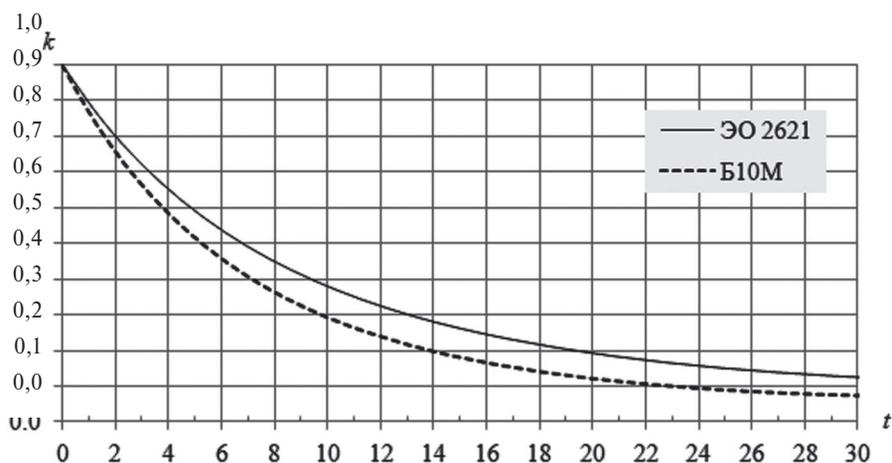


Рис. 1. Зависимость коэффициентов годности машин от возраста

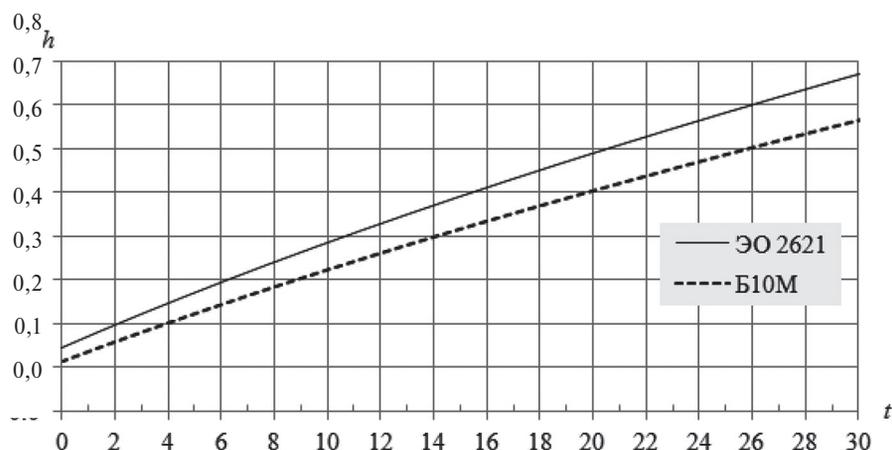


Рис. 2. Зависимость удельной продолжительности ТОиР машин от возраста

Отметим, что полученная динамика КИМВ хорошо согласуется с имеющейся (правда, отрывочной) фактической информацией об использовании машин соответствующих марок разного возраста (Смоляк, 2008, 2016). Кроме того, предельные возраста машин, отвечающие их предель-

ной наработке, составляют для Б10М и ЭО2621 соответственно 30 и 35 лет, что немного больше максимальных возрастов таких машин, выставленных на продажу.

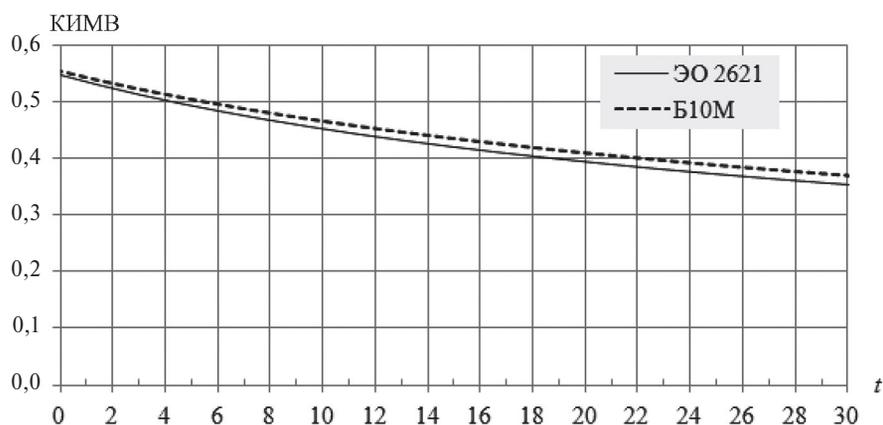


Рис. 3. Зависимость от возраста коэффициентов использования машин по времени

Расчеты показали также, что значение ставки дисконтирования (r) мало влияет на окончательные результаты.

* * *

При стоимостной оценке машин оценщики определяют коэффициенты их обесценения или годности в зависимости от возраста машин. Допущения, которые при этом делаются, недостаточно адекватно отражают процесс физического изнашивания машин. Дело в том, что в технических науках и теории надежности процесс физического изнашивания машины связывают с увеличением ее наработки, а не возраста. Соответственно, объектами анализа там являются зависимости производительности и надежности машины от наработки. Наблюдения за процессом использования отдельных машин также показывают, что с увеличением наработки машин существенно снижается их надежность и растут затраты на их техническое обслуживание и ремонт.

Предложенная модель, основанная на использовании метода дисконтирования денежных потоков и принципе наиболее эффективного использования, учитывает указанные обстоятельства. Из нее выводятся и более обоснованные и хорошо согласующиеся с имеющейся рыночной информацией зависимости коэффициента годности машин от их возраста. Вместе с тем модель не учитывает возможности существенного улучшения технического состояния машины при ее капитальном ремонте. Учет такой возможности требует проведения дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асаул А.Н., Старинский В.Н., Бездудная А.Г., Старовойтов М.К. (2011). Оценка собственности. Оценка машин, оборудования и транспортных средств. Асаул А.Н. (ред.). СПб.: АНО "ИПЭВ".
- Вейг Н.В. (2009). Оценка машин и оборудования. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ.
- Лейфер Л.А. (ред.). (2015). Справочник оценщика машин и оборудования. Корректирующие коэффициенты и характеристики рынка машин и оборудования. Нижний Новгород: Приволжский центр методического и информационного обеспечения оценки.
- Лейфер Л.А., Кашникова П.М. (2008). Определение остаточного срока службы машин и оборудования на основе вероятностных моделей // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. № 1(86). С. 66–79.
- Смоляк С.А. (2008). Проблемы и парадоксы оценки машин и оборудования. М.: РИО МАОК.
- Смоляк С.А. (2009). Эргодические модели износа машин и оборудования // *Экономика и математические методы*. Т. 45. Вып. 4. С. 42–60.
- Смоляк С.А. (2013). Оценка износа зданий: модель Тимана и ее обобщения. Часть 1 // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. № 12 (147). С. 6–20.

- Смоляк С.А.** (2014а). Оценка износа зданий: модель Тимана и ее обобщения. Часть 2 // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. № 1 (148). С. 25—35.
- Смоляк С.А.** (2014б). Оптимизация ремонтной политики и оценка стоимости машин с учетом их надежности // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 2 (22). С. 102—131.
- Смоляк С.А.** (2014в). Оценка стоимости машин с учетом условий их эксплуатации // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. № 8 (155). С. 70—82.
- Смоляк С.А.** (2016). Стоимостная оценка машин и оборудования (секреты метода ДДП). М.: ООО “Издательский дом Опцион”.
- Ящура А.И.** (2006). Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования. М.: НЦ ЭНАС.
- Assessors' Handbook 581. Equipment and Fixtures Index, Percent Good and Valuation Factors. (2018). [Электронный ресурс] California State Board of Equalization. Режим доступа: <https://www.boe.ca.gov/proptaxes/pdf/ah58118.pdf>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: май 2019 г.).
- Tiemann M.** (1970). Reformvorschläge zum Ertrags- und Sachwertverfahren // *Allgemeine Vermessungsnachrichten*. Vol. 12. P. 523—530.

REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Asaul A.N., Starinsky V.N., Bezdudnaya A.G., Starovoytov M.K.** (2011). Property Valuation: Machinery, Equipment and Vehicles Valuation. Asaul A.N. (ed.). St. Petersburg: IPEV (in Russian).
- Assessors' Handbook 581. Equipment and Fixtures Index, Percent Good and Valuation Factors. (2018). California State Board of Equalization. Available at: <https://www.boe.ca.gov/proptaxes/pdf/ah58118.pdf> (accessed: May 2019).
- Leyfer L.A.** (ed.) (2015). The Handbook of the Machinery and Equipment Appraiser. The adjusting Coefficients and Characteristics of Machinery and Equipment Market. Nizhniy Novgorod: Volga Center for Methodical and Informational Support of Valuation (in Russian).
- Leyfer L.A., Kashnikova P.M.** (2008). Determination of the Residual Service Life of Machinery and Equipment Based on the Probabilistic Models. *Property Relations in the Russian Federation*, 1 (86), 66—79 (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2008). Problems and Paradoxes of the Machinery and Equipment Valuation. Moscow: RIO MAOC (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2009). Ergo-Dynamic Models of Depreciation of Machinery and Equipment. *Economics and Mathematical Methods*, 45, 4, 42—60 (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2013). Assessment of Building Depreciation: The Tiemann Model and Its Generalization. Part 1. *Property Relations in the Russian Federation*, 12 (147), 6—20 (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2014а). Assessment of Building Depreciation: The Tiemann Model and Its Generalization. Part 2. *Property Relations in the Russian Federation*, 1 (148), 25—35 (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2014б). Overhaul Policy Optimization and Equipment Valuation Concerning Its Reliability. *Journal of the New Economic Association*, 2 (22), 102—131 (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2014с). Machinery and Equipment Valuation with Regard to their Operation Conditions. *Property Relations in the Russian Federation*, 8 (155), 70—82 (in Russian).
- Smolyak S.A.** (2016). Machinery and Equipment Valuation (Secrets of the DCF Method). Moscow: Publishing House Option LLC (in Russian).
- Tiemann M.** (1970). Reform Proposals for Improving the Income Valuation Approach. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 12, 523—530 (in German).
- Veyg N.V.** (2009). Machinery and Equipment Valuation: Tutorial. St. Petersburg: Publishing house SPSUEF (in Russian).
- Yashchura A.I.** (2006). The System of Maintenance and Repair of General Industrial Equipment. Moscow: NTS ENAS (in Russian).

Influence of Deterioration of Machinery and Equipment on the Dynamics of their Market Value

© 2019 S.A. Smolyak

*Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: smolyak1@yandex.ru*

Received 19.11.2018

This study was carried with financial support by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-010-99666).

Valuing machinery and equipment, it is usually necessary to determine their depreciation/obsolescence. Dependencies of the Percent Good Factor on age are used for this purpose. The shape of such dependencies is not always justified enough. Because of this, the value of fairly old machines is either too low or very high. To eliminate this drawback, this article proposes different descriptions of the process of deterioration for machinery items. At the same time, the deterioration of the operational characteristics of machinery (productivity, failure rate, operating costs, maintenance and repair costs, use-time ratio of the machine) is not tied to age, but to machine's cumulative hours of operation. To calculate the market value of the machine, we use the Discounted Cash Flows method. To avoid subjectivity in the long-term forecasting of cash flows, we apply the principle of anticipated benefits to a small forecast period and combine it with the highest and best use principle. As a result, it takes the following form: the asset value at the valuation date does not exceed the expected value of the discounted cash flow from its use during a small period (including the asset value at the end of the period), and coincides with this expectation if the asset is used in the highest and best way. A mathematical model based on this principle allows us to obtain analytical expressions for the market value of the machine. For each type of machinery and equipment items, the calibration parameters of the model can be selected from the data on the main characteristics and market prices of new and used machinery items of this type. The constructed model was used to estimate depreciation dynamics for two types of construction equipment. The results obtained are in good agreement with the data on the market prices of such equipment of different ages.

Keywords: machinery, equipment, maintenance, repair, market value, depreciation, market approach, anticipation of benefits principle, highest and best use, reliability.

JEL Classification: C61, D24, D46, D81, M41.

DOI: 10.31857/S042473880005785-2