

УДК 629.33:658.51

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПО НОРМАТИВНОЙ СТЕНДОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Х. А. ФАСХИЕВ

faskhiev@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 28.05.2013

**Аннотация.** Проведен краткий анализ методов разработки несущих деталей и агрегатов транспортных средств, обеспечения их эксплуатационной надежности при проектировании. Приведены теоретические основы проектирования деталей и узлов автомобиля с использованием усталостных характеристик материалов деталей и нормативной стендовой долговечности, соответствующей заданному эксплуатационному ресурсу транспортного средства. Применение предложенной методики на практике показано на примере проектирования картера переднего моста полноприводного автомобиля.

**Ключевые слова:** деталь; автомобиль; долговечность; стендовые испытания; кривая усталости; геометрические размеры.

### ВВЕДЕНИЕ

В жизненном цикле обеспечения конкурентоспособности сложнотехнических изделий, таких как транспортные средства, особое место занимает этап разработки. При проектировании закладываются экономичность, качество и конкурентоспособность изделия, при обеспечении которых производитель может рассчитывать на коммерческий успех товара на рынке. Основные усилия производителя в жизненном цикле изделия должны быть направлены на этап создания, тогда он будет продаваться без усилий. Технология проведения проектных работ в настоящее время несовершенна: в недостаточном объеме проводятся стратегические маркетинговые исследования, на предпроектном этапе не производится детальный анализ требований потребителей, в техническом задании принимаются такие параметры, которые не всегда рациональны с точки зрения потребителя, недостаточно используются результаты научно-технического прогресса, не всегда проводится оптимизация параметров изделия [1]. Все это негативно отражается на уровне конкурентоспособности новой техники.

В настоящее время в мире накоплен большой опыт разработки транспортных средств, проведены обширные исследования в области обеспечения их эксплуатационной надежности. Однако применяемые технологии разработки и

постановки на производство новой техники несовершенны, не обеспечивают реализацию на практике принцип “делать правильно с первого раза”. Доказательство тому – огромные эксплуатационные затраты потребителей автомобильной техники на ремонт и обслуживание. Выбор неоптимальных параметров при разработке, пренебрежение требований к качеству при производстве приводят к значительным экономическим потерям в эксплуатации, низкой конкурентоспособности новой модели. Например, трудоемкость содержания в технически исправном состоянии автомобилей до первого капитального ремонта в 5–8 раз больше трудоемкости их изготовления, а за весь амортизационный период – в 60–70 раз. В автомобилестроении расходы на производство автомобилей составляют лишь 1,5 % от общих расходов, затрачиваемых в течение всего жизненного цикла изделия [1].

Меры по обеспечению конкурентоспособности проектируемой модели должны приниматься с «первых шагов» по ее созданию. Неверные решения, принятые на начальных этапах проекта, многократно возрастают по мере прохождения этапов жизненного цикла товара и могут свести к «нулю» труд огромного коллектива, поэтому разработчикам возлагается большая ответственность. По оценкам американских специалистов, если все меры обеспечения качества принять за 100 %, то 75 % приходится на

проектирование и доводку макетного образца, отладку технологии изготовления; 20 % – на контроль производственных процессов; 5 % – на окончательную приемку изделия. Европейская организация по качеству отмечает, что в мире действует правило «70–20–10», согласно которому 70 % отказов происходит из-за упущений при проектировании, 20 % – из-за некачественного изготовления и 10 % – из-за несоблюдения правил эксплуатации [3].

Прогресс в транспортном машиностроении сопровождается форсированием рабочих процессов, увеличением напряженности элементов конструкций при одновременном повышении надежности и ресурса создаваемых машин. Выполнение растущих требований к надежности и ресурсу может быть достигнуто за счет разработки оптимальных конструкций, устранения избыточных запасов прочности, максимального использования возможностей материала и технологии. Однако чем больше ресурс конструкции, тем сложнее прогнозировать их надежность. Используемые методы установления и повышения ресурса, основанные на сборе и обработке информации о работоспособности конструкций в период их доводки на полигоне и в эксплуатации на автомобиле, требуют значительного времени. Отставание поступающей информации о работоспособности и надежности конструкций сдерживает темпы увеличения их ресурса. В значительной мере это связано с тем, что до последнего времени доводка конструкций несущей системы и ходовой части автомобилей на ресурс заключалась в проведении длительных испытаний по эксплуатационной программе на заданный ресурс. Естественно, что для проверки эффективности мероприятий, внедряемых для устранения дефектов и накопления статистических данных, подтверждающих стабильность результатов, доводка и проверка конструкций на большой ресурс (500 тыс. км пробега и более) растягивается на многие годы, и планируемая модель морально устаревает прежде, чем достигается требуемый ресурс конструкции.

## 1. ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ

Конкурентоспособность изделия может быть достигнута за счет нормирования процедур проектирования в стандартах предприятия. Процесс проектирования – это трансформация требований потребителей в техническую документацию для производства. Большинство процессов проектирования, кроме творческих, мо-

гут быть стандартизованы. При наличии таких стандартов можно поставить барьер «дефектам» разработки. Ошибки, допущенные на стадии проектирования, трудно исправить, а само исправление требует существенных затрат. Необходимость стандартизации процессов на этапах создания новой продукции очевидна. Технология создания нового продукта поэтапно должна вести к освоению производства продукта, полностью соответствующего требованиям потребителей.

С целью упорядочивания процесса разработки, формирования и обеспечения желаемых потребителями технико-экономических показателей проектируемых изделий был разработан ГОСТ 15.001-88 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения». Согласно данному стандарту разработчик на основе исходных требований заказчика, изучения спроса, условий применения, тенденций развития и имеющегося научно-технического задела должен проводить необходимые научно-исследовательские, опытно-конструкторские технологические работы, включая патентные исследования, функционально-стоимостный анализ, моделирование, художественное конструирование и другие прогрессивные методы создания продукции. В стандарте не предписывались конкретные подходы, методы обеспечения качества проектируемых изделий. При создании автомобильной техники проектными организациями, конструкторских служб автозаводов за основу организации работ был принят ОСТ 37.001.503-72 «Единая система конструкторской документации. Стадии разработки», в соответствии с которым процесс проектирования автотранспортных средств разделялся на стадии и этапы.

Разработчики в ходе создания автомобилей придерживались требований вышеотмеченных стандартов, однако у каждого из них были свои методы достижения принятых в техническом задании технико-экономических показателей. Наиболее трудной проблемой при создании сложных технических изделий, к которым относятся и транспортные средства, является обеспечение требуемых показателей надежности. Для решения данной проблемы в мировом автомобилестроении на этапе проектирования и доводки широко используются алгоритмы, изображенные на рис. 1 и 2 [2]. Особенность алгоритма, изображенного на рис. 1, в том, что долговечность деталей и агрегатов оцениваются дважды: при проектировании – по приближенным зна-

чениям эксплуатационных нагрузок, а при доводке – уже по уточненным. Метод трудоемок и не определяет порядок проведения и режимы испытаний. Кроме того, часто на ранних стадиях проектирования невозможно изготовить прототипы деталей, узлов. Многократные испытания таких узлов, как рама, надрамник, платформа, подвеска, кабина, мосты, коробка передач, раздаточная коробка и др. требуют больших материальных затрат.

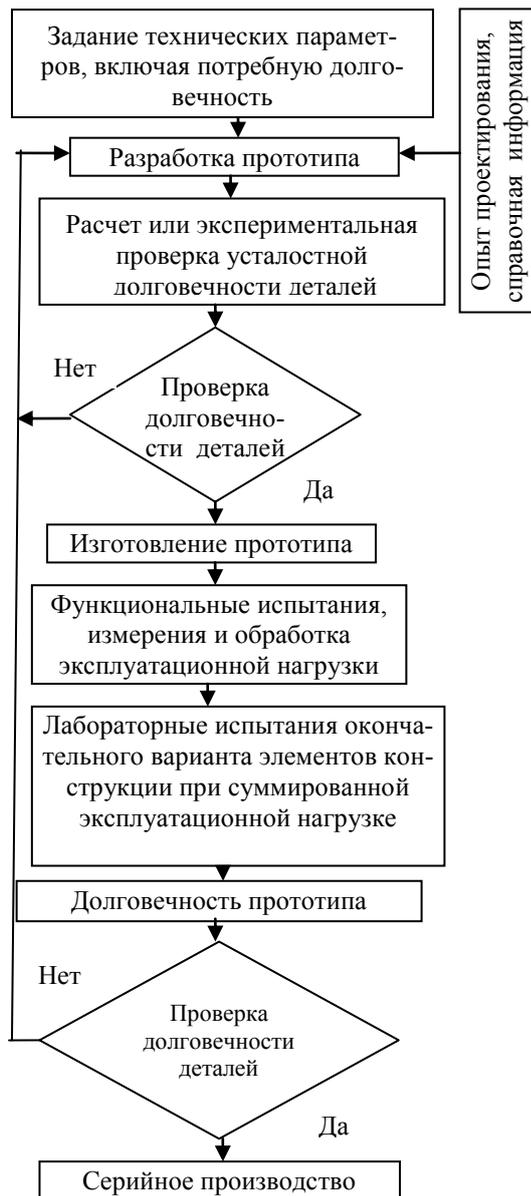


Рис. 1. Схема разработки и доводки конструкции

В данной схеме недостаточное внимание уделяется вопросам компьютерного моделирования как изделия в целом, так и его узлов, деталей, испытания и доводки изделия, предусматривается лишь испытание опытного образца перед освоением серийного производства модели. До-

рожные испытания, программные стендовые испытания на долговечность в этой схеме вообще не упоминаются.

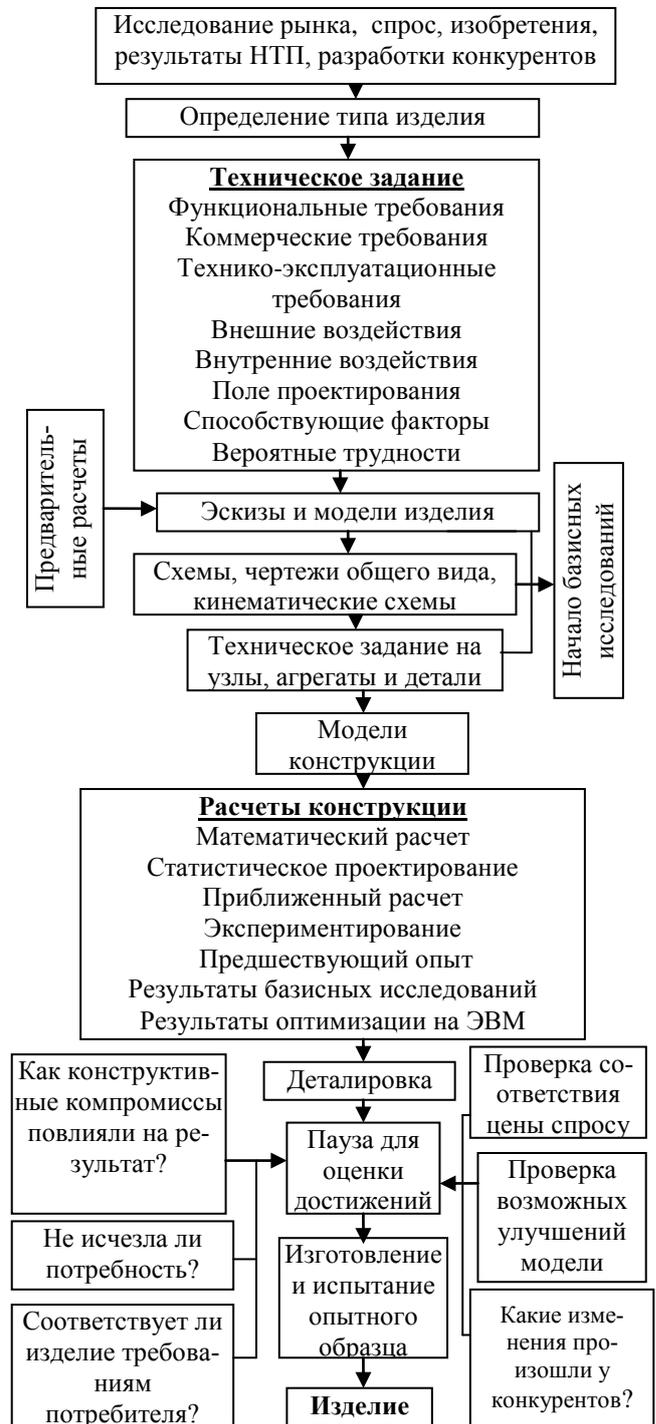


Рис. 2. Схема процесса проектирования

На схеме процесса проектирования, изображенного на рис. 2 уделяется самое пристальное внимание выбору технических параметров изделия при разработке новой модели. Проектирование автомобиля проводится с учетом требований потребителей и заказчиков, процесс начинается

с изучения рынка. В ходе проектирования постоянно возвращаются к проделанной работе, чтобы уточнить или согласовать ранее выбранные параметры, поэтому разделение процесса проектирования на стадии и этапы является условным [4]. В данной методике предусматривается проверка в ходе разработки технико-экономических параметров проектируемого изделия на соответствие требованиям потребителей, что позволяет своевременно корректировать ошибочные решения, повысить конкурентные позиции новой модели.

Годы						
1	2	3	4	5	6	7
Конструкторские работы						
Замысел и его осуществимость	Основные расчеты конструкции и изготовление компоновочных чертежей					
	Детализовка и определение узлов для испытаний					
	Художественное конструирование. Подготовка рабочих чертежей					
	Доводка, испытание					
Испытания						
Испытания образцов						
Подготовка материалов для испытаний						
Изготовление образцов автомобилей для испытаний						
Получение исходных данных испытаний						
Функциональные испытания руля, тормозов, органов управления, подвески, системы охлаждения, отопления, на удобство обслуживания, шум						
Испытание на выносливость автомобиля на вибростенде, анализ напряжений в эксплуатации						
Сертифицированные испытания тормозов, замков, освещения, ремней безопасности			Эксплуатационные испытания производственных образцов	Опытное производство	Серийное производство	

Рис. 3. Цикл разработки грузового автомобиля методом последовательного приближения

При разработке автомобилей также используется модульный принцип проектирования [4], базирующийся на общетехническом принципе агрегатирования, который заключается в следующем: системы и другие сложотехнические устройства представляют собой агрегат, состоя-

щий из нескольких независимых устройств (модулей); членение на модули проводится так, чтобы каждый из них выполнял определенную функцию и имел конструктивно-техническую законченность; виды устройств выбираются так, чтобы их можно было собрать в агрегат с заданными техническими свойствами. При данном подходе необходимо учесть взаимовлияние отдельных модулей на характеристики изделия в целом. Иначе машина, собранная из совершенных по отдельности агрегатов, может оказаться неэффективной, с низкими технико-эксплуатационными показателями.

На рис. 3 приведен цикл разработки грузового автомобиля, включающий комплекс лабораторно-дорожных исследований на этапах проектирования [7]. Согласно данной методике, уже в ходе начального этапа проектирования ведется экспериментальная проверка применяемых материалов, спроектированных деталей и оценивается экспериментально-расчетная долговечность. Окончательная оценка долговечности производится на этапе доводки путем программных ресурсных испытаний на основе данных режимометрирования детали в условиях эксплуатации и только после этого, в случае положительного результата, прототип ставится на серийное производство.

Экспериментальная оценка нагруженности, усталостной прочности и долговечности несущих узлов и деталей автомобиля – процесс, как известно, длительный и дорогостоящий. Поэтому разработчики эксперимент стараются заменить расчетом. Тем более что нынешнее состояние вычислительной техники и технологий тоже «подталкивает» к этому. Однако практика доказала: расчет дает точные и достоверные результаты лишь при условии, что исходные данные для него реальны, т.е. соответствуют «поведению» объекта в условиях эксплуатации, а методика расчета, положенная в его основу, достаточно полно учитывает это «поведение».

## 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПО НОРМАТИВНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Расчетных методик доводки конструкций в настоящее время существует много. Они различаются между собой сложностью реализации, полнотой учета физических закономерностей работы исследуемых деталей и, следовательно, степенью отклонения результатов расчета от результатов экспериментов. На данный момент есть надобность в создании методики, которая

не требовала бы ресурсных натурных испытаний как автомобиля, так и его элементов конструкции. А в качестве исходных данных для расчетов достаточно было бы иметь экспериментальную информацию о характеристиках материалов, из которых эти элементы предполагается изготавливать, и статистические данные долговечности аналогичных конструкций.



Рис. 4. Блок-схема проектирования несущих деталей автомобиля

Это могут быть результаты стендовых испытаний, полигонная статистика по автомобилям и их элементам – аналогам, справочные данные, экспертная оценка, естественно, результаты эксплуатации прототипов проектируемого автомобиля. При этом наиболее важны сведения о распределении напряжений в конструкции, поскольку усталостные трещины и разрушения появляются, как правило, именно в наиболее нагруженных локальных зонах.

В данной работе предлагается методика проектирования несущих деталей, агрегатов автомобиля, критерием работоспособности которых является усталостная долговечность (рис. 4). В данной методике в отличие от известных, предусмотрены следующие процедуры: а) расчет ресурса проектируемых агрегатов и деталей с учетом заданного в техническом задании ресурса автомобиля, полученных на аналогах квантиля и коэффициента вариации, а затем определение нормативного ресурса агрегата и детали лимитирующего надежность; б) установление эквивалентной нормативной стендовой долговечности проектируемой детали при помощи кривых соответствия эксплуатационного ресурса детали их стендовой долговечности, полученных на аналогах при определенных режимах испытания; в) расчет геометрических размеров деталей с учетом параметров кривой усталости детали из выбранного материала, нормативной стендовой долговечности и силовой схемы нагружения при стендовых испытаниях, при которых были установлены кривые соответствия ресурса стендовой долговечности.

Ресурс автомобиля при заданной категории условий эксплуатации устанавливается в техническом задании. На практике, как правило, его определяют исходя из ресурса таких основных агрегатов автомобиля, как рама, кабина, мосты, предельное состояние которых определяется усталостным разрушением их элементов. При разработке новой модели необходимо определить ресурс агрегатов, деталей автомобиля, который должен определяться заданным ресурсом автомобиля. Надежность автомобиля, как сложной технической системы, определяется надежностью его систем и подсистем. Вероятность его безотказности  $P$  в предположении, что выход из строя одной подсистемы приводит к выходу из строя автомобиля, равна произведению вероятностей безотказности его агрегатов  $p_{bi}$ . При предположении равенства средневекторных

ческих отклонений ресурсов агрегатов она равна

$$P = p_{b1} \cdot p_{b2} \cdot \dots \cdot p_{bn} = \prod_{i=1}^n p_{bi} \quad (1)$$

Безотказность агрегатов, при условии их одинаковой надежности, для обеспечения заданной вероятности безотказной работы автомобиля должна соответствовать условию

$$p_{b1} = p_{b2} = \dots = p_{bi} = (P)^{1/n}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

При типовых режимах эксплуатации ресурс деталей транспортных средств, оцениваемых по критерию «усталостное разрушение», имеет распределение Вейбулла, частным случаем которого является нормальное распределение [5]. При допущении о нормальности распределения ресурса агрегатов автомобиля вероятность безотказности  $i$ -го агрегата определяется по соотношению

$$P_{bi} = \frac{1}{2,5 \cdot \sigma_{bi}} \int_L^{\infty} e^{-\frac{(L-L_{bi})^2}{2 \cdot \sigma_{bi}^2}} \cdot \sigma_{bi}^{-2} dL = \Phi(t_{bi}) \quad (3)$$

где  $L$  – заданный в техническом задании ресурс автомобиля;  $L_{bi}$ ,  $\sigma_{bi}$  – соответственно средний ресурс  $i$ -го агрегата и среднее квадратичное отклонение ресурса;  $\Phi(t_{bi})$  и  $t_{bi}$  – функция и квантиль нормального распределения.

С учетом того, что квантиль и среднее квадратичное отклонение рассчитываются по формулам

$$t_{bi} = (L - L_{bi}) / \sigma_{bi}; \quad \sigma_{bi} = V_{bi} \cdot L_{bi}, \quad (4)$$

можем определить средний ресурс  $i$ -го агрегата:

$$L_{bi} = L / (1 + V_{bi} t_{bi}). \quad (5)$$

Здесь  $V_{bi}$  – коэффициент вариации среднего ресурса  $i$ -го агрегата. При отсутствии экспериментальных данных аналогичных конструкций  $V_{bi}$  можно принять в пределах  $0,2 \div 0,5$  [9].

Надежность агрегата в свою очередь определяется надежностью деталей, входящих в него. Число деталей, лимитирующих надежность (ДЛН) агрегата, обычно ограничено ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). Тогда для ДЛН средний ресурс при его нормальном распределении будет определяться из соотношения

$$L_{bi} = L_{bij} / (1 + V_{bij} t_{bij}) \quad (6)$$

или с учетом формулы (5)

$$L_{bij} = L / [(1 + V_{bi} t_{bi})(1 + V_{bij} t_{bij})]; \quad (7)$$

где  $V_{bij}$  – коэффициент вариации среднего ресурса  $j$ -й детали  $i$ -го агрегата;  $t_{bij}$  – квантиль нормального распределения ресурса  $L_{bij}$ , который определяется из функции  $p_{bij} = f(t_{bij})$ .

Безотказность  $j$ -й детали исходя из безотказности агрегата или автомобиля вычисляется по соотношению  $p_{bij} = (p_{bi})^{1/m} (P)^{1/nm}$ . Средний ресурс и безотказность детали, не входящей в число ДЛН агрегата, принимается равным ресурсу и вероятности безотказности самого агрегата.

Несущие детали автомобиля в эксплуатации подвергаются нагрузкам, переменным во времени, и их оценочным показателем является усталостная долговечность, поэтому при разработке основные размеры деталей должны определяться по данному критерию.

Усталость металлов – это явление со сложной физической природой, обусловленное многими факторами: свойствами структуры металлов; условиями нагружения; масштабным фактором и геометрией изделий; асимметрией; частотой и формой цикла нагружения и другими параметрами, влияющими на долговечность конструкций автомобиля. Считается, что усталостные разрушения связаны с зарождением и распространением трещин, которые могут быть хрупкими, вязкими и комбинированными.

Наиболее соответствующая эксплуатационным требованиям конструкция должна проектироваться с учетом усталости, для чего необходимо иметь спектр эксплуатационных нагрузок детали и ее характеристики сопротивления усталости, которые на этапе проектирования отсутствуют, что усложняет задачу проектирования автомобилей требуемой надежности. Для многих несущих деталей в настоящее время разработаны методики стендовых испытаний на усталость при гармоническом режиме нагружения и нормы долговечности, при соответствии которым деталь не разрушается в эксплуатации [5]. В условиях испытаний оговариваются методы расчета режима нагружения и условия закрепления детали на стенде. Если известны эти данные для аналога, то можно проектировать новые детали по условию соответствия конструкции нормативной долговечности на стенде, которая эквивалентна определенному эксплуатационному ресурсу.

Усталостное разрушение происходит в результате постепенного накопления единичных повреждений, по сути, физическая сущность разрушения детали в эксплуатации  $L$  и в стен-

довых испытаниях  $N$  одинаково и соответственно могут быть выражены функциями

$$\begin{aligned} N &= f(\sigma_{ic}; n_{ic}; k_{\text{эф}}; m); \\ L &= f(\sigma_{id}; n_{id}; k_{\text{эф}}; m). \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\sigma_{is}$ ,  $\sigma_{id}$  – амплитуды напряжений детали в стендовых и дорожных условиях нагружения;  $n_{is}$ ,  $n_{id}$  – число циклов нагружения детали в стендовых и дорожных условиях;  $k_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений в опасном сечении;  $m$  – характеристика кривой усталости материала детали.

Накопление повреждений детали в стендовых и дорожных условиях при одних и тех же  $k_{\text{эф}}$  и  $m$  определяются спектром действующих нагрузок, и существует функция

$$L = f(N), \quad (9)$$

т. е. каждому значению долговечности, полученному в стендовых условиях, соответствует определенный пробег в эксплуатации. Для автомобилей, эксплуатировавшихся в одинаковых условиях, для деталей одного назначения соотношение (9) отличается незначительно, т. к. для этих деталей условия нагружения в стендовых и дорожных условиях идентичны. Пользуясь соотношением (9), полученным для аналога при заданном в техническом задании ресурсе  $L_n$ , определяется нормативная стендовая долговечность  $N_n$ . При этом режим нагружения аналога и вновь проектируемой детали в стендовых условиях назначается по одной и той же методике.

Наиболее достоверные соотношения (9) могут быть установлены статистической обработкой результатов наблюдений контрольных партий, аналогичных опытной модели, автомобилей в эксплуатации и при испытаний деталей в стендовых условиях. Это связано с тем, что одну и ту же деталь невозможно испытать в стендовых условиях и устанавливать на автомобиль для дорожных испытаний. Поэтому только статистической обработкой можно установить функцию соответствия стендовой долговечности эксплуатационному ресурсу.

Интегральная функция распределения ресурса детали в эксплуатации определяется для контрольной партии автомобилей, которая принимается за расчетную выборку, и обычно бывает многократно усеченной, т.к. из-за больших различий условий эксплуатации происходит интенсивное «перемешивание» величин пробегов деталей до разрушения с пробегом не разрушенных деталей. Значение эмпирической функ-

ции распределения  $F_i$  в этом случае для  $i$ -го интервала определяют из соотношений

$$F_i(L) = m_i / (N + 1), \quad (10)$$

где  $N$  – число испытываемых объектов;  $m_i$  – накопленная частота разрушенных деталей в  $i$ -м интервале, величина которой определяется по формуле

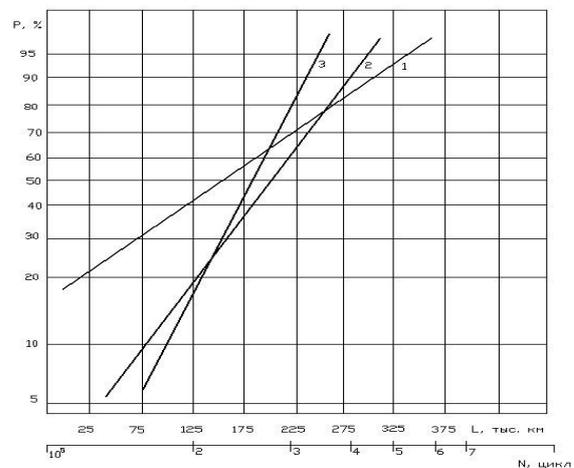
$$m_i = m_{i-1} + n_i \frac{N + 1 - m_{i-1}}{N + 1 - \sum_{i=1}^i (q_i + n_i)}. \quad (11)$$

Усталостные разрушения деталей в эксплуатации обычно описываются законом распределения Вейбулла

$$F(L) = 1 - \exp[-(L-L_0)/(L_a-L_0)^{\epsilon}], \quad (12)$$

где  $L_0$  – параметр минимальной долговечности;  $L_a$  – параметр характеристического ресурса, соответствующий вероятности разрушения, равной 63,2 %;  $\epsilon$  – параметр закона распределения.

Параметры функции распределения определяются по известным методам [6] аналитически, или по графическому изображению функции распределения ресурса детали на вероятностной бумаге (рис. 5).



**Рис. 5.** Функции распределения долговечности картера ведущего моста автомобиля КамАЗ-4310: 1 – в стендовых условиях; 2 – в эксплуатации по экспериментальным данным; 3 – расчетный по результатам режимометрирования на дорогах автополигона

Обработка результатов стендовых испытаний и получение закона распределения долговечности деталей, испытанных на постоянном уровне нагрузок проводится аналогично, но при этом учитывается тот факт, что на стенде все

детали при испытаниях доводят до разрушения и функция распределения долговечности детали определяется по формуле для полной выборки

$$F = i/(N+1), \quad (13)$$

где  $i$  – порядковый номер разрушенной детали, определенной по величине долговечности.

Из условия равенства интегральных функций ресурса и долговечности определяется функция соответствия  $L = f(N)$ . При испытании детали на постоянном уровне нагрузок долговечность деталей описывается логарифмически-нормальным законом

$$F(\lg N) = \frac{1}{S_{\lg N} \sqrt{2H}} \int_0^{\lg N} \left[ \exp -\frac{(\lg N - \lg \bar{N})^2}{2S_{\lg N}^2} \right] d \lg N, \quad (14)$$

где  $S_{\lg N}$  – среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности детали. Наиболее часто функция соответствия (9) описывается уравнением

$$L - L_0 = \frac{(L_0 - L_a)^6}{0,433} \lg \left[ \int_0^{\lg N} \exp \left[ -\frac{(\lg N - \lg \bar{N})^2}{2S_{\lg N}^2} \right] d \lg N - 1 \right]. \quad (15)$$

Аналогичные уравнения могут быть получены и при других законах распределения ресурса и долговечности детали.

Соотношения (9) для деталей автомобилей при наличии данных эксплуатационной нагруженности и стендовых испытаний могут быть определены из соотношений

$$N_i = (\sigma_{Rd} / k_{\Phi i} \sigma_a)^m N_\sigma; \quad (16)$$

$$L_i = \frac{l_0 \cdot \sigma_{Rd}^m \cdot N_\sigma}{\sum_{j=1}^k \alpha_j \sum_{\xi=1}^{\tau} n_\xi (\sigma_{a\xi} \cdot k_{\Phi i})^m}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{Rd}$ ,  $m$ ,  $N_\sigma$  – параметры кривой усталости детали;  $k_{\Phi i}$  – текущее значение эффективного коэффициента концентрации напряжений;  $\sigma_a$  – амплитуда напряжений в номинальной зоне детали при стендовых испытаниях в гармоническом режиме нагружения;  $l_0$  – длительность записи нагруженности детали при режимометрировании в дорожных условиях;  $\alpha_j$  – относительный пробег автомобиля по дороге типа;  $\sigma_{a\xi}$  – амплитуда напряжений  $\xi$ -го уровня на дороге;  $n_\xi$  – число повторения амплитуд напряжений  $\sigma_{a\xi}$  на дороге.

Для выбранных режимов нагружения при изменении эффективного коэффициента концентрации напряжений в пределах:

$$k_{\Phi i \min} \leq k_{\Phi i} \leq k_{\Phi i \max}$$

долговечность детали и ресурс меняются в пределах от максимального до минимального значения, т.е., каждому значению  $k_{\Phi}$  соответствует одно значение  $N$  и  $L$ . Исключая из зависимостей

$$\left. \begin{aligned} N &= f(k_{\Phi}) \\ L &= f(k_{\Phi}) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

значение  $k_{\Phi}$ , можно определить функцию  $L = f(N)$ , которая обычно выражается графически (рис. 6).

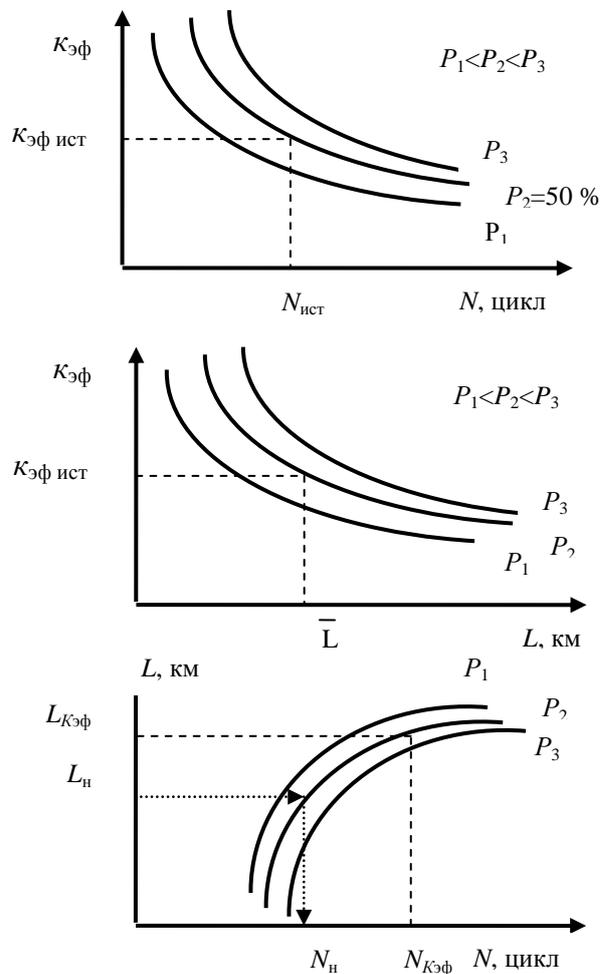


Рис. 6. Схема определения функции  $L = f(N)$  по коэффициенту эффективности для заданной вероятности разрушения детали

Для высоконагруженных деталей с концентраторами напряжений наиболее целесообразным при расчете долговечности является локально-деформационный подход. Это прежде всего, обусловлено тем, что зависимость напряжений от деформаций при установившихся циклических воздействиях существенно отличается от зависимости напряжений, от деформа-

ций в условиях статического воздействия, и распространенный метод перевода измеренных деформаций в напряжения умножением на модуль упругости материала вносит существенные ошибки на результаты расчета долговечности.

С учетом правила Нойбера [8] размах деформаций в зоне концентрации напряжений определяется по величине номинальных напряжений из соотношения

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{k_{\text{эф}}^2 \cdot \Delta e^2}{2\Delta\varepsilon} + \left( \frac{k_{\text{эф}}^2 \cdot \Delta e^2 \cdot E}{\Delta\varepsilon \cdot 2k'} \right)^{\frac{1}{n'}}, \quad (19)$$

где  $\Delta e$  – размах деформаций в номинальной зоне;  $k'$  – циклический коэффициент упрочнения;  $n'$  – показатель циклического деформационного упрочнения.

Функция зависимости долговечности от нагруженности при «жестком» режиме нагружения определяется по уравнению

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^a + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (20)$$

где  $\sigma'_f$ ,  $\varepsilon'_f$  – коэффициент усталостной прочности и пластичности соответственно;  $2N_f = N$  – число циклов нагружения до разрушения при постоянном режиме нагружения;  $a$ ,  $c$  – показатели усталостной прочности и пластичности.

Функция  $N=f(k_{\text{эф}})$  определяется по соотношениям (19)–(20) по значениям номинальных деформаций  $\Delta e$  в стендовых условиях. В дорожных условиях зависимость  $L = f(k_{\text{эф}})$  определяется по формуле

$$L = \frac{l_a}{\sum_{j=1}^k \alpha_j \sum_{\xi=1}^r \left( \frac{n_{\xi}}{N_{\xi}} \right) \cdot k_{y\delta}}, \quad (21)$$

где  $n_{\xi}$  – число повторений за пробег  $l_0$  деформаций  $\Delta\varepsilon_{\xi}$ ;  $N_{\xi}$  – число циклов до разрушения детали при деформации  $\Delta\varepsilon_{\xi}$  в стендовых условиях при жестком режиме нагружения.

Исключая  $k_{\text{эф}}$  из зависимости (18), находим функцию соответствия (9), которую обычно изображают графически. Истинное значение ресурса соответствует значению  $k_{\text{эф ист}}$ , определенному в стендовых условиях и соответствует значению долговечности  $N_{\text{ист}}$ .

Таким образом, одним из предложенных выше методов можно сопоставить эксплуатационный ресурс аналога со стендовой долговечностью. Выбор метода зависит от имеющейся информации по результатам стендовых и эксплуатационных исследований аналога. Для

примера на рис. 7 и 8 приведены функции соответствия ресурса на дороге к долговечности в стендовых условиях картера ведущего управляемого моста полноприводного автомобиля и картера моста самосвала КамАЗ-55111, полученные на основе результатов стендовых и дорожных испытаний изучаемых агрегатов. Аналогичные зависимости могут быть получены и по другим агрегатам, деталям автомобилей.

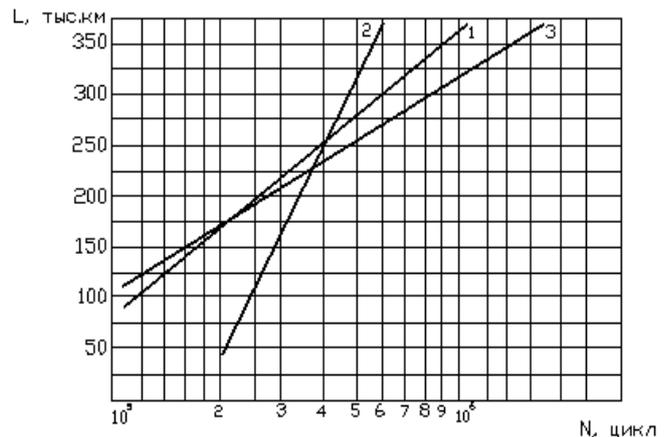


Рис. 7. Функции соответствия ресурса на дороге к долговечности в стендовых условиях картера ведущего управляемого моста автомобиля КамАЗ-4310: 1 – экспериментальная; 2 – расчетно-экспериментальная по  $k_{\text{эф}}$ ; 3 – расчетно-экспериментальная по В. П. Когаеву [9]

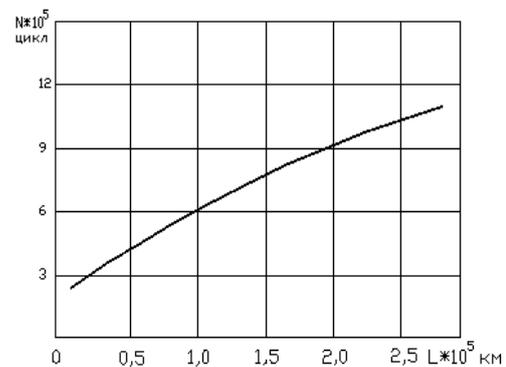


Рис. 8. Функции соответствия ресурса на дороге к долговечности в стендовых условиях картера моста самосвала КамАЗ-55111

Авторами работ [9, 10] получены функции соответствия стендовой долговечности эксплуатационному ресурсу для картеров, шаровых опор мостов, ведущих цилиндрических шестерен, подшипников главных передач, рам, надрамников, кабин, реактивных штанг балансирной подвески автомобилей семейства КамАЗ, разработаны методы расчета геометрических

размеров деталей грузового автомобиля: несущих деталей (картеров, шаровых опор), валов, подшипников, зубчатых колес переднего ведущего управляемого моста полноприводного автомобиля. В частности, установлено, что при циклическом закручивании на угол  $\pm 3^\circ$  в режиме резонанса рамы в сборе с платформой, нагруженной с номинальной нагрузкой, стендовая долговечность должна быть не менее 135 тыс. циклов, что эквивалентно пробегу 350 тыс. км в первой категории условиях эксплуатации. Балки мостов в сборе должны иметь при номинальной нагрузке прогиб не менее 1,5 мм на 1 м колеи; статический запас по кручению в пределах 1,6...1,8; по вертикальному изгибу – 6,5; циклическую долговечность не менее  $1 \cdot 10^6$  циклов при нагружении с отнулевой нагрузкой в 2,5 раза превышающей номинальную. Для картеров ведущих управляемых мостов полноприводных автомобилей, испытанных в этих условиях, долговечность  $0,75 \cdot 10^6$  циклов эквивалентна пробегу в эксплуатации 350 тыс. км, а для шаровых опор мостов, для обеспечения этого пробега долговечность должна быть не менее  $0,27 \cdot 10^6$  циклов. При испытании на изгибную усталость зубчатых колес главной передачи в сборе под максимальным крутящим моментом двигателя на первой передаче коробки передач долговечность зубчатых колес, равная  $3,5 \cdot 10^5$  циклов, эквивалентна ресурсу в эксплуатации 350 тыс. км. Испытания на контактную усталость должны вестись при максимальном крутящем моменте двигателя на второй передаче КП. Долговечность на стенде  $2,8 \cdot 10^6$  циклов эквивалентна ресурсу в эксплуатации 350 тыс. км [9].

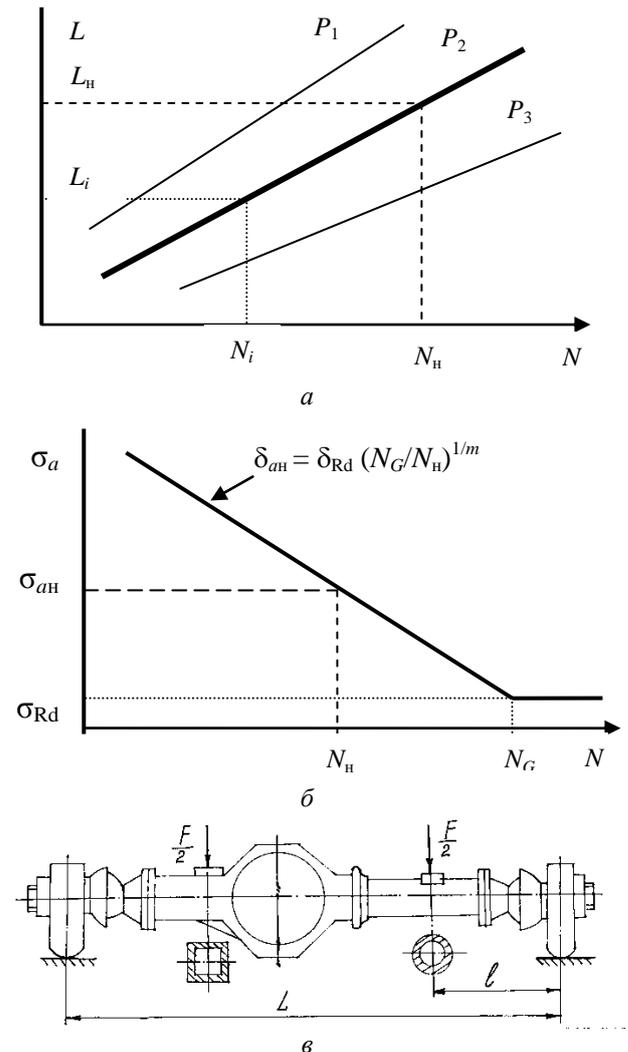
При наличии функций соответствия (9) ресурса на дороге к долговечности в стендовых условиях долговечности деталей-аналогов для проектируемой детали по значению требуемого эксплуатационного ресурса, определенного по формуле (7), можно установить нормативную стендовую долговечность при оговоренных режимах испытания и спроектировать ее на соответствие нормативной долговечности. Для этого по справочным данным определяются параметры кривой усталости детали  $\sigma_{Rd}$ ,  $N_G$ ,  $m$  и рассчитывают сначала амплитуду напряжений в опасном сечении детали при стендовых испытаниях по формуле

$$\sigma_a = \sigma_{Rd} \cdot (N_G / N_H)^{1/m}, \quad (22)$$

а затем, исходя из условий нагружения при испытании, геометрические параметры детали в опасном сечении

$$A = f(F_i, \sigma_a), \quad (23)$$

где  $A$  – величина, характеризующая геометрию детали, например при сжатии–растяжении – это площадь сечения детали, при изгибе – момент сопротивления изгибу, при кручении – полярный момент сопротивления;  $F_i$  – амплитуда переменных нагрузок, приложенных на деталь при стендовых испытаниях. Схематично этот процесс для картера переднего моста изображен на рис. 9.



**Рис. 9.** Определение геометрических параметров деталей картера переднего моста автомобиля по стендовой нормативной долговечности: *a* – определение нормативной стендовой долговечности исходя из нормативного ресурса по соотношению  $L = f(N)$ ; *б* – расчет нормативных амплитуд напряжений в сечениях детали при стендовых испытаниях; *в* – определение геометрических параметров детали, подвергаемого изгибу

$$W_{\varphi} = K_d \cdot F_{ном} \cdot 1 / (2 \cdot \delta_{Rd\varphi} \cdot (N_{GR} / N_H)^{1/m});$$

$$W_{\varphi} = (0,5 - 1) \cdot W_{\varphi}; \quad D = (10 \cdot W_{\varphi} - d_{\text{ш3}})^{1/3}$$

Размеры детали рассчитываются по всем сечениям. В дальнейшем полученная конструкция проверяется на соответствие требованиям статической прочности и жесткости, а при вхождении детали в упругую систему осуществляется проверка на резонанс.

В случаях, когда геометрические размеры детали определяются по компоновочным или иным соображениям, материал детали может быть выбран по значению предела выносливости, рассчитанному из соотношения

$$\sigma_{-1} = f(F_i) \cdot K / [A(N_G/N_H)^{1/m}], \quad (24)$$

где  $K$  – суммарный коэффициент снижения предела выносливости.

Описанный подход к проектированию деталей автомобиля, подвергаемых переменным по времени нагрузкам, по заданному ресурсу и надежности, схематично приведен на рис. 10.

Описанный алгоритм проектирования (см. рис. 5) применим для всех деталей, критерием

работоспособности которых является усталостная долговечность. Кроме того, при применении данной методики проектирования существенно упрощается доводка детали, т.к. во-первых, уже на этапах проектирования устанавливаются режимы ее испытания, во-вторых, испытания проводятся ускоренно в регулярном гармоническом режиме нагружения с целью проверки выполнения функции соответствия (9).

## ВЫВОДЫ

Таким образом, разработаны теоретические основы проектирования деталей и узлов автомобиля с использованием усталостных характеристик материалов деталей и нормативной долговечности их в стендовых условиях испытания.

Предложенный метод расчета необходимого эксплуатационного ресурса детали, лимитирующего надежность изделия, позволяет объективно устанавливать ресурс детали по заданному в техническом задании ресурсу автомобиля.

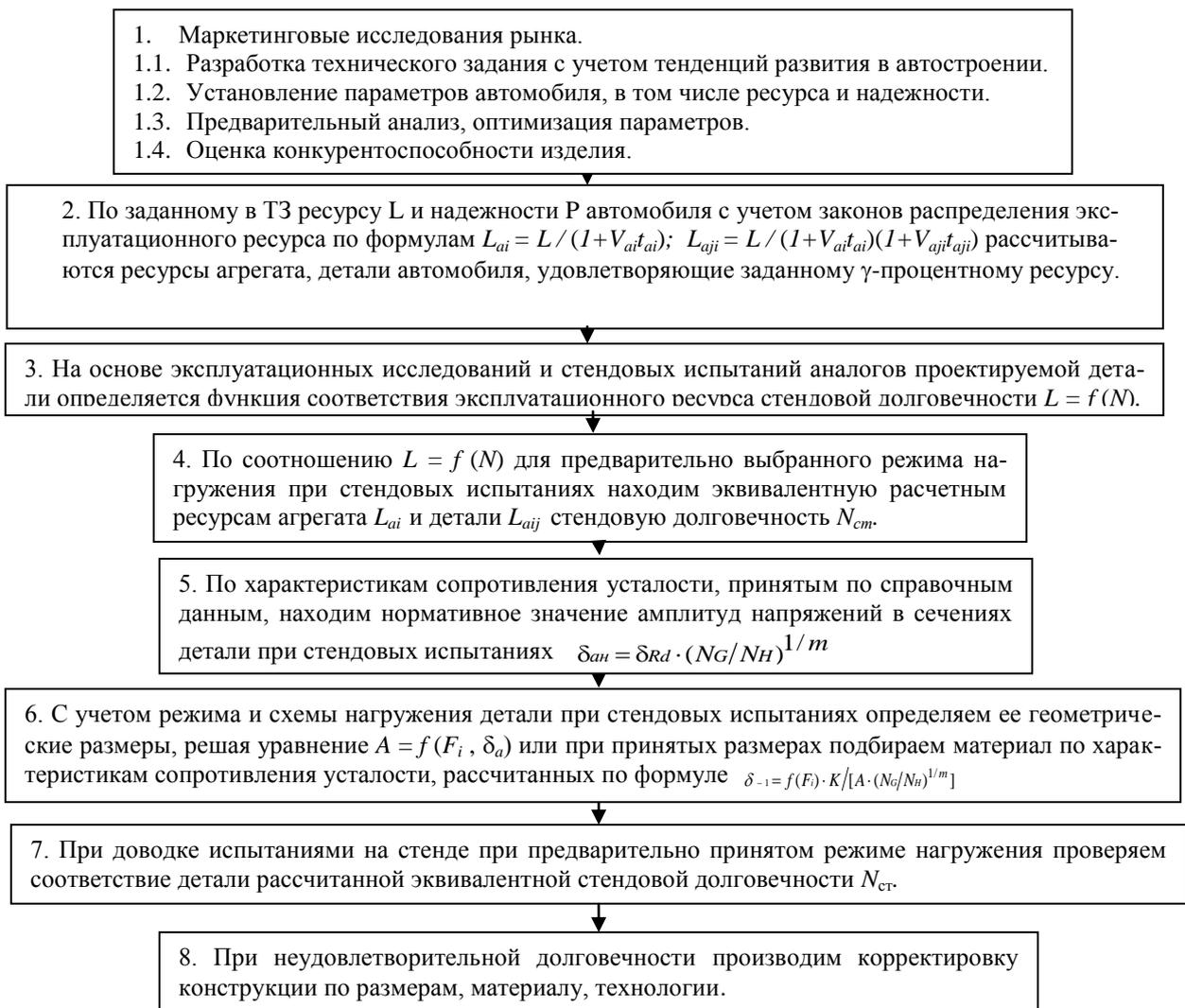


Рис. 10. Блок-схема проектирования деталей автомобиля, подвергаемых переменным по времени нагрузкам

Приведенный метод определения соответствия ресурса детали в эксплуатации долговечности в условиях стендовых испытаний позволяет проектировать детали на соответствие нормативной стендовой долговечности. При наличии функции соответствия стендовой долговечности эксплуатационному ресурсу и характеристик сопротивления усталости применяемых материалов деталь проектируется на соответствие заданному ресурсу автомобиля. Каких-либо существенных препятствий к применению предложенной методики проектирования деталей на соответствие нормативной долговечности нет, может применяться при проектировании не только транспортных средств, но и других изделий машиностроения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Костин И. М., Фасхиев Х. А.** Техничко-экономическая оценка грузовых автомобилей при разработке. Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2002. 480 с.
2. Организационные и экономические основы технической подготовки производства / под ред. М. И. Ипатов, А. В. Проскурякова, Л. Я. Шухгалтера. М.: Машиностроение, 1972.
3. **Гиссин В. И.** Управление качеством продукции. Ростов на Дону: Феникс, 2000. 256 с.
4. **Фасхиев Х. А.** Методы проектирования и доводки деталей ходовой системы грузовых автомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: НАМИ, 1995. 20 с.
5. **Джонсон Н., Лион Ф.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 610 с.
6. **Старк Д. А.** Конструирование и испытание большегрузных автомобилей и тяжелых тракторов // Автомобильная промышленность США. 1979. № 2. С. 21–27.
7. **Якоби Г.** Механические испытания материалов и узлов. Дармштадт: Шенк и Шенк-Требель, 1981.
8. **Когаев В. П.** Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 285 с.
9. **Фасхиев Х. А.** Разработка норм прочности деталей грузовых автомобилей // Грузовик. 2003. № 12. С. 22–25.
10. **Фасхиев Х. А., Павленко П. Д., Галимянов А. Д.** Проектирование деталей автомобилей с учетом усталости // Современные тенденции развития автомобилестроения России : сб. докл. 3-й всеросс. НТК. Тольятти: ТГУ, 2004. С. 41–47.

#### ОБ АВТОРЕ

**Фасхиев Хакимян Амирович**, проф. каф. прикл. гидромех. УГАТУ и каф. экон., менедж. и маркетинга Финанс. ун-та при Правит. РФ. Дипл. инж. по машинам лесн. пром. (Марийск. политехн. ин-т, 1982), дипл. экономист (Казанск. фин.-экон. ин-т, 1999). Д-р техн. наук по колесн. и гусен. машинам (НАМИ, 1999). Иссл. в обл. проектир. и испыт. трансп. средств, управления конкурентоспособн. в техн. и соц.-экон. системах.

#### METADATA

**Title:** Design of details of vehicles on standard bench durability.

**Authors:** Kh. A. Faskhiev.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** faskhiev@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, No. 4 (57), pp. 44-55, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The short analysis of methods of development of bearing details and units of vehicles, ensuring their operational reliability at design is carried out. Theoretical bases of design of details and car knots with use of fatigue characteristics of materials of the details and standard bench durability corresponding to the set operational resource of the vehicle are given. Application of the offered technique in practice is shown on the example of design of a case of the forward bridge of the all-wheel drive car.

**Key words:** detail; car; durability; bench tests; fatigue curve; geometrical sizes.

#### References (English Transliteration):

1. I. M. Kostin and Kh. A. Faskhiev, *Technical and economic assessment of trucks when developing*, (in Russian). Naberezhnye Chelny: KAMPI, 2002.
2. *Organizational and economic bases of technical training of production*, M. I. Ipatov Ed., (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1972.
3. V. I. Gissin, *Product quality control*, (in Russian). Rostov on Don: Fenix, 2000.
4. Kh. A. Faskhiyev, *Methods of design and operational development of details of running system of trucks: Autoreferat cand. tech. sci.* Moscow: NAMI, 1995.
5. N. Johnson and F. Lyon, *Statistika and experiment planning in equipment and science. Data processing methods.* Moscow: Mir, 1980.
6. D. A. Stark, "Designing and test heavy-load avtomobikly and heavy tractors", (in Russian), *Automotive industry of the USA*, no 2, pp. 21-27, 1979.
7. G. Jacobi, *Mechanical tests of materials and knots.* Darmstadt: Schenk and Schenk-Trebel, 1981.
8. V. P. Kogayev, *Calculations on durability at a tension of variables in time*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1977.
9. Kh. A. Faskhiev, "Development of norms of durability of details of trucks," (in Russian), *Gruzovikk*, no. 12, pp. 22-25, 2003.
10. Kh. A. Faskhiev, P. D. Pavlenko, and A. D. Galimyanov, "Design of details of cars taking into account fatigue," in *Proc. 3<sup>rd</sup> Conf. "Current Trends of Development of Automotive Industry of Russia"*, Tolyatti: TGU, 2004, pp. 41-47.

#### About author:

**Faskhiev, Khakimzan Amirovich**, prof., chair of an applied hydromechanics UGATU, prof. of chair of economy, management and marketing of Financ. univ. under the Government of the RF. Dipl. engineer (Mari polytechnic inst., 1982), dipl. economist (Kazan financ. and economic inst., 1999). Dr. of tech. sci. (NAMI, 1999). Researches in the field of design and tests of vehicles, management of competitiveness of technical, social-econ. systems.