

Дущенко В.В.

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЙ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЖЕННОСТИ  
ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПОДВЕСКИ  
ГУСЕНИЧНЫХ И КОЛЕСНЫХ МАШИН

Проведена оценка возможных направлений снижения тепловой напряженности демпфирующих устройств подвески, наиболее перспективными из которых являются применение нетрадиционных систем охлаждения и стабилизации на основе использование тепловой трубы и фазовых переходов I-го рода.

Dushchenko V.V.

ESTIMATION OF DIRECTIONS OF DECLINE OF THERMAL LOADING OF  
DAMPING DEVICES OF A SUSPENSION SYSTEM OF CATERPILLAR AND  
WHEELED MACHINES

The estimation of possible directions of decline of thermal tension of snubbers is conducted pendants most perspective from that it is been application of the un conventional systems of cooling and stabilizing on the basis of use of thermal pipe and phase transitions of I of family.

---

УДК 539.3

*Карпейчик И.Н., канд. эконом. наук; Чепурной А.Д., д-р техн. наук;  
Ткачук Н.А., д-р техн. наук*

**МНОГОУРОВНЕВЫЕ ГИБРИДНЫЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
МОДЕЛИ ДЛЯ СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ  
СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

**Введение.** Современное машиностроения характеризуется резкой интенсификацией проектных работ по созданию специальных транспортных средств с высокими техническими и тактико-техническими характеристиками (ТТХ). В этих условиях особые требования предъявляются к степени адекватности расчетных моделей наиболее ответственных и нагруженных элементов этих машин. Следует принять во внимание также и степень ответственности при принятии проектно-технологических решений, базирующихся на создаваемых расчетных моделях. В частности, особую важность при этом приобретают проблемы, связанные с разработкой и изготовлением элементов высокоответственных технологических, военных, транспортных машин специального назначения. Это, например, машины для работы на режимных объектах (аэродромы, АЭС, предприятия химической промышленности), машины для транспортировки опасных грузов (жидкостей, газов и т.д.), боевые машины (бронетранспортеры, боевые машины пехоты, тягачи), элементы заправочных комплексов для ракетной техники и т.д. К таким машинам предъявляются особые повышенные требования. При этом условия работы данных машин сопряжены с выполнением широкого спектра регламентированных операций или боевых задач, а выполняемые функции настолько ответственны, что требуется высокая прочность, надежность, недопущение поломок и аварий. При проектировании таких машин в силу наличия многих трудноучитываемых факторов, стохастических воздействий, разного рода нелинейностей заранее сложно предвидеть и рассчитать действующие в ходе их эксплуатации нагрузки. Это усложняет расчетное обоснование рациональных параметров высокоответственных элементов данных машин.

Существующая в настоящее время распространенная практика проектно-исследовательских работ [1], основанная на широком применении CAD/CAM/CAE-технологий для обоснования рациональных конструктивных решений и параметров проектируемых машин на основе численного моделирования физико-механических процессов, не обеспечивает в данном случае в полной мере достоверного результата, поскольку действующие в процессе эксплуатации машин рабочие нагрузки зачастую априорно неизвестны не только по своей величине, но и по составу компонент, а также законам распределения отдельных составляющих комплекса нагрузок в пространстве и во времени.

В результате приходим к ситуации, когда на начальном этапе проектных работ создается ситуация нечеткости задания основных составляющих исходных данных, в частности, действующих нагрузок. В свою очередь, нечеткость задания этой важной исходной информации для численного моделирования приводит и к нечеткости выходных данных от решения задачи анализа, а, значит, и последующих задач их структурного и параметрического синтеза. Таким образом, возникает существенное противоречие между потребностями машиностроения, с одной стороны, а также теорией и практикой оптимального проектирования элементов высокоответственных машин, – с другой.

Отдельные вопросы создания адекватных расчетных моделей наиболее нагруженных элементов высокоответственных машин описаны в ряде статей [1-7]. В них на основе метода обобщенного параметрического описания элементов сложных и сверхсложных механических систем сделаны попытки обосновать процедуру идентификации элементов математической и численной моделей исследуемых объектов. В частности, привлекает внимание технология с использованием гибридных расчетно-экспериментальных моделей [1]. Она, в частности, направлена на идентификацию отдельных составляющих многокомпонентной системы эксплуатационных сил, действующих на проектируемую машину, на основе данных об исследованиях машин-аналогов.

В то же время этот подход имеет ряд недостатков. Один из наиболее существенных – неучет специфики исследуемых конструкций. Действительно, проводимые авторами расчетно-экспериментальные исследования не принимали во внимание подобие и отличие в конструкциях исследованных машин. Например, обращаясь к исследованию автоцистерн аэродромных топливозаправщиков, можно отметить *общие характерные особенности* их конструкции: структура; исполнение (тонкостенная подкрепленная сварная конструкция); типы нагружения, а также *отличия*: габариты; параметры листов; величины нагрузок. То же – и для других типов машин.

Таким образом, между этими двумя множествами (подобия и отличия) существует сложный комплекс покомпонентных отношений. В статье [1] из этого многообразия было вычленено хотя и очень важное, но отдельно взятое отношение. В результате неучитываемого комплекса остальных отношений могут допускаться погрешности, которые априори достаточно сложно оценить. Таким образом, возникает актуальная и важная задача разработки усовершенствованных расчетно-экспериментальных технологий построения расчетных, математических и численных моделей исследуемых элементов тяжело нагруженных машин для выполнения высокоответственных технологических, транспортных операций или решения боевых задач с учетом особенностей их конструкции и условий нагружения. Решение данной актуальной задачи составляет цель исследований, проведенных и описанных в данной статье.

**Методика решения задачи.** Решается задача разработки адекватных и точных расчетно-экспериментальных моделей проектируемых тонкостенных пространствен-

ных сварных конструкций. В данном случае традиционная технология расчетно-экспериментальных исследований [1, 2] по циклу, представленному на рис. 1 (здесь  $R$  – реальный объект (проектируемая машина);  $M, N, E$  – математическая, численная и экспериментальная модели исследуемых объектов;  $I, D, F, C$  – этапы идеализации, дискретизации, физического моделирования и верификации результатов), модифицируется на каждом этапе  $I - D - C - F$ , а также применительно к каждому компоненту модельного ряда  $R - M - N - E$ . Сразу же принимаются в расчет конструктивные (тонкостенность) и технологические (сварные соединения) особенности объекта. Это сразу проецируется на математическую модель  $M$ . Поскольку определяющим в данном случае является напряженно-деформированное состояние (НДС) исследуемого объекта, то естественным способом идеализации  $I$  является представление конструкции  $R$  в виде пространственной оболочечно – пластинчато – стержневой системы, НДС которой определяется либо из локальной, либо из вариационной постановок. В то же время полученная математическая модель, в отличие от традиционных подходов, которые предполагают моделирование сварной конструкции в виде системы соединенных между собой оболочек, пластин и стержней из однородного по механическим и физико-механическим свойствам материала, дополняется областями, имитирующими сварные швы в виде подобластей из материала, по свойствам отличающегося от основного. Благодаря этим двум особенностям, изначально вводимым в математическую модель, удается ввести в число варьируемых основные конструктивно-технологические параметры исследуемых конструкций, учтя тем самым и ее особенности.

На этапе дискретизации  $D$  (см. рис. 1) предлагается также ввести ограничение на привлекаемые для этого методы, сразу выбрав в качестве основного метод конечных элементов (МКЭ). Таким образом, получаем сразу конкретную модель  $N$  – конечно-элементный ансамбль, дискретизирующий с той или иной характерной степенью сгущения – разрежения получаемую из  $M$  геометрическую модель (т.е. объединение поверхностей и линий, на которые наращены оболочки, пластины и стержни). Такое предпочтение МКЭ следует из опыта расчета подобных конструкций, а также из огромных возможностей программных пакетов, реализующих метод конечных элементов.

При этом можно сразу записать разрешающее уравнение МКЭ в общем виде:

$$M\ddot{x} + K\dot{x} + Cx = F(t), \quad (1)$$

имея в виду, что матрицы масс  $M$ , демпфирования  $K$ , жесткости  $C$ , а также вектор узловых нагрузок  $F$  формируются на основе учета конструктивно-технологических особенностей и анализа условий эксплуатации той или иной исследуемой конструкции (назовем их всех элементами обобщенного параметрического пространства  $P = \{p_i\}$ , однозначно определяющими математическую модель  $M = M(p)$  исследуемого объекта). В данном случае считаем, что для различных  $p$  существует также алгоритм однозначного построения численной модели  $N = N(p)$ . Это можно осуществить, следуя методологии, изложенной в статье [3]. Подытоживая, можно заключить, что, постулировав и учтя характерные особенности исследуемых объектов, а также задекларировав использование МКЭ в интеграции с методом обобщенного параметрического описания сложных механических систем, удастся «сдвоить» этапы математического и численного моделирования. При их объединении напрямую получаем модель  $MN = MN(p)$ ,

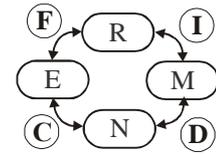


Рис. 1. Традиционная технология расчетно-экспериментальных исследований

а как инструмент получения этой модели по тому или иному набору параметров предлагается использование технологии специализированных интегрированных систем [3]. По этой технологии в данном случае в данном случае естественным образом получаем двоякий процесс  $\dot{I} + D = \dot{I}D$ .

Обращаясь к этапу экспериментальных исследований, нужно принять во внимание, что на данный момент существует обширный опыт проектирования аналогичных машиностроительных конструкций. Таким образом, сама структура машины, механизма, сооружения, оборудования может быть почерпнута в первом приближении из аналогов. Оттуда можно также привлечь и большой пласт результатов экспериментальных исследований машин-аналогов в лабораторных, полигонных и производственных условиях. Эта информация, имеющаяся в распоряжении проектантов, требует инструмента для организации ее анализа и обобщения. Таким образом, этап  $F$  (см. рис. 1) «расслаивается», вбирая в себя физическое моделирование машин-аналогов (часть уже известной информации), а также моделирование проектируемой машины (часть информации, которую на момент начала проектных работ нужно будет получить в ходе проектных исследований и полигонных испытаний). Естественно, что в данном случае, в отличие от этапов  $M, N$ , которые «сливались», получаем «расслоение» моделей  $E: E = \bigcup E_i$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots$  – элементы этого множества, причем  $i = 0$  – проектируемая машина, а  $i = 1, 2, \dots$  – машины-аналоги.

Рассматривая ключевой момент – сравнение  $C$  (см. рис. 1) результатов экспериментальных и численных исследований и создание адекватной и точной модели  $MN^*$  по итогам верификации параметров  $p^*$ , нужно ввести критерий оценки несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований. В отличие от традиционного одинарного критерия [1-3]

$$J(p) = \|u_N(p) - u_E(p)\| \rightarrow \min \quad (2)$$

предлагается интегральный критерий

$$J(p) = \sum_q \gamma_q \cdot J_q, \quad q = 1, \dots, N_q. \quad (3)$$

Здесь  $J(p)$  – интегральный критерий несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований, вычисляемый путем сопоставления норм несовпадений распределений переменных состояния  $u$  ( $u_N(p)$  – численных и  $u_E(p)$  – экспериментальных). Он образуется при помощи взвешенного суммирования с весами  $\gamma_q$  «парциальных» составляющих:

$$J_q = \|u_N(p) - u_E(p)\|, \quad \sum_q \gamma_q = 1, \quad q = 0, 1, \dots, N_q. \quad (4)$$

Суммирование ведется по количеству «срезов»  $q$ . Это количество  $N_q$  обуславливается объемом имеющейся в распоряжении информации о результатах экспериментального исследования машин-аналогов, причем с учетом различных видов испытаний каждой. К этому количеству добавляется также и проектируемая машина.

В результате задача идентификации ставится в виде:

$$\{p^*, f^*\} = \arg \min J(p, f). \quad (5)$$

Имея в распоряжении массив  $p^*$ , можно ставить задачу оптимизации:

$$L(u, \tilde{P}, f, t) = 0; T(\tilde{P}) \rightarrow \max; H(u(\tilde{P})) \leq H', \quad (6)$$

где  $L$  – оператор задачи (в данном случае – система соотношений метода конечных элементов (1));  $u$  – переменные состояния (в данном случае – узловые перемещения и углы поворота);  $f$  – внешние воздействия;  $\tilde{P}$  – оптимальные параметры, доставляющие максимум техническим характеристикам  $T$  и удовлетворяющие массиву ограничений  $H'$ ;  $t$  – время.

Что касается массива обобщенных параметров  $P$ , то он состоит из трех подгрупп:

$$P = P_{iden} \cup P_{var} \cup P_{const}, \quad (7)$$

где  $P_{iden}$  – идентифицируемый по процедуре (4) подмассив;  $P_{var}$  – определяемый по процедуре (6) подмассив;  $P_{const}$  – подмассив постоянных параметров, определяемый общими конструктивными, технологическими, экономическими и эксплуатационными соображениями (рис. 2).

Соответственно, выделяются три этапа синтеза: I – определение структуры и основных неизменных параметров машины – из общих соображений и

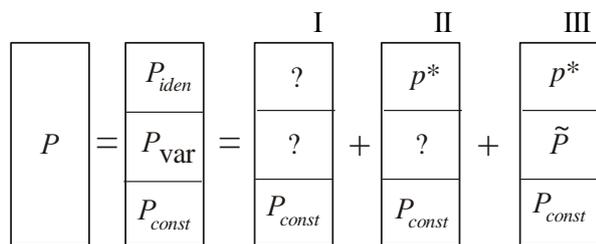


Рис. 2. Состав множества обобщенных параметров

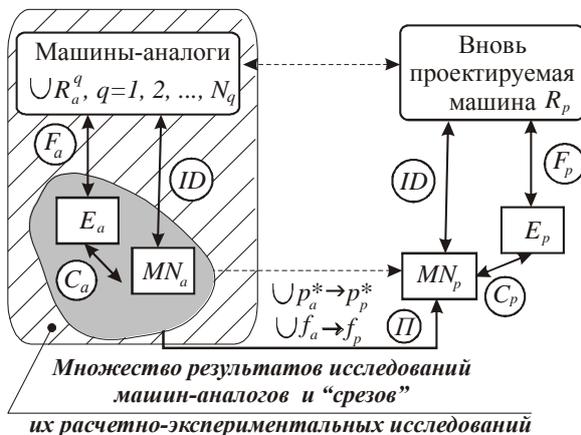


Рис. 3. Структура расчетно-экспериментальных исследований с применением многослойных моделей:

$R$  – реальный объект (проектируемая машина);  $MN$  – объединенные математическая и численная,  $E$  – экспериментальные модели исследуемых объектов;  $*$ <sub>a</sub> – модели, соответствующие машине-аналогу;  $*$ <sub>p</sub> – модели, соответствующие проектируемой машине;  $ID$  – объединенные этапы идеализации и дискретизации;  $F$  – физического моделирования;  $C$  – верификации результатов;  $II$  – этап синтеза «полигибридных» моделей

опыта проектантов; II – идентификация параметров расчетной модели машины; III – параметрическая оптимизация машины. Таким образом, общую методологию параметрического синтеза, объединяющую в едином процессе идентификацию и оптимизацию, можно представить в виде последовательности этапов I-III (см. рис.2), II-й и III-й из которых более подробно приведены на рис. 3, 4.

При реализации предложенной методологии исследований параллельно и взаимосвязанно проводятся 2 цикла расчетно-экспериментальных исследований объектов по традиционной технологии [1-7]: для машин-аналогов и для проектируемой машины. Они обычно разнесены по времени: сначала проводится цикл исследований машин-аналогов по имеющимся «срезам», далее по аналогии создается математическая и численная модели проектируемой машины.

Следующим шагом является интеграция в расчетную модель  $MN_p$  параметров  $(p_p)^*$  и усилий  $f_p$ , вычисляе-

мым по параметрам идентификации, – качественно новый этап  $\Pi$ , при осуществлении которого собственно создается «полигибридная» модель объекта. Далее на ее основе (см. рис. 4) осуществляется поиск оптимальных параметров проектируемой машины.

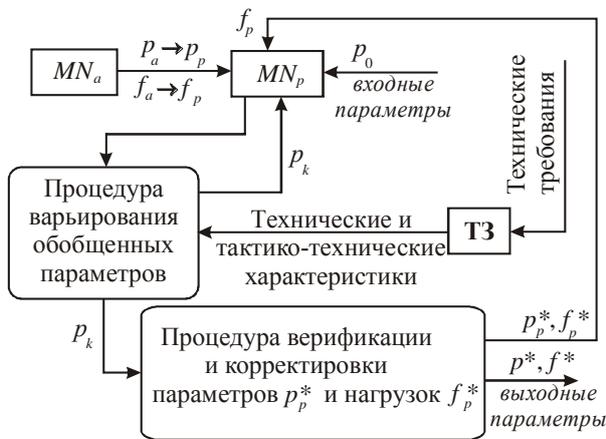


Рис.4. Синтез параметров проектируемых машин с применением «полигибридных» расчетно-экспериментальных моделей

а также перед известными алгоритмами расчетно-экспериментальных исследований [1]. При этом достигаются: экономия времени и средств; высокая достоверность при определении параметров расчетных моделей и эксплуатационных нагрузок для проектируемых машин, что повышает их адекватность, а, в конечном итоге, обеспечивает с более высокой точностью расчет оптимальных структур и параметров исследуемых машин по критериям надежности, долговечности, массы, стоимости; разрабатывается научно-обоснованная структура, параметры и свойства не только для расчетной модели отдельно взятой машины, но и для целой их серии, в т.ч. и тех, которые будут создаваться в будущем. Кроме того, еще одной отличительной особенностью данного подхода является присущая ему естественная возможность прямого встраивания в процесс поэтапного уточнения оптимальной структуры и параметров проектируемых машин в рамках процесса конструирования и технологической подготовки производства.

Принципиальным отличием предложенного подхода от известного варианта расчетно-экспериментального метода [1] является то, что в предложенном в статье подходе критерий соответствия строится на *полном* множестве машин и параметров, а в варианте [1] метода – на *частном* множестве, соответствующем множеству машин-аналогов. Соответственно, существует опасность, что построенная таким образом численная модель с определенными нагрузками  $f^P$  окажется недостаточно адекватной и точной для проведения исследований проектируемой машины  $M^P$ . Для устранения данного возможного несоответствия в подходе, описанном в статье, критерий *минимизации* несоответствия результатов численных и экспериментальных исследований распространяется и на вновь проектируемую машину.

В дальнейшем планируется апробировать предложенный подход в ходе расчетно-экспериментальных исследований ряда машин.

**Литература:** 1. *Общий подход к обоснованию параметров проектируемых машин на основе гибридных расчетно-экспериментальных моделей* / Чепурной А.Д., Глинин Г.П., Литвиненко А.В. [и др.] // *Механика та машинобудування*. – 2004. – № 1. – С. 103-109. 2. *Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем* / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глуценко [и др.] // *Механика та машинобудування*. – 2004. – №2. – С. 85–96. 3. *Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной*

генерації і параметризованого описання / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2006. – №1. – С. 57–79. 4. Расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств / Е.В. Пелешко, А.Ю. Васильев, Г.Д. Гриценко [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2007. – №1. – С. 95–100. 5. Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем / Н.А. Ткачук // *Сб. научн. тр. “Динамика и прочность машин”*. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып.56. – С. 175–181. 6. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования деформаций элементов механических систем. / Н.А. Ткачук, А.А. Капустин // *Вестник ХГПУ. Тем. вып.: Динамика и прочность машин*. – 1999. – Вып.57. – С. 148–155. 7. Ткачук Н.А. Комбинированные расчетно-экспериментальные методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем / Н.А. Ткачук // *Механіка та машинобудування*. – 1999. – №1. – С. 37–46.

**Bibliography (transliterated):** 1. Obvij podhod k obosnovaniju parametrov proektiruemyh mashin na osnove gibridnyh raschetno-jeksperimental'nyh modelej / Chepurnoj A.D., Glinin G.P., Li-tvinenko A.V. [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2004. - № 1. – S. 103-109. 2. Reshe-nie zadach raschetno-jeksperimental'nogo issledovanija jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem / N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, Je.V. Ghuwenko [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2004. – №2. – S. 85–96. 3. Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija / N.A. Tkachuk, G.D. Gricenko, A.D. Chepurnoj [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2006. – №1. – S. 57–79. 4. Raschetno-jeksperimental'naja identifikacija parametrov chislennyh mo-delej korpusnyh jelementov transportnyh sredstv / E.V. Peleshko, A.Ju. Vasil'ev, G.D. Gricenko [i dr.] // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 2007. – №1. – S. 95–100. 5. Tkachuk N.A. Intensivnaja shema jeksperimental'nyh issledovanij jelementov tehnologi-cheskih sistem / N.A. Tkachuk // *Sb. nauchn. tr. “Dinamika i prochnost' mashin”*. – Har'kov: HGPU. – 1998. – Vyp.56. – S. 175–181. 6. Tkachuk N.A. Raschetno-jeksperimental'nyj metod issledovanija deformacij jelementov mehanicheskikh sistem. / N.A. Tkachuk, A.A. Kapustin // *Vestnik HGPU. Tem. vyp.: Dinamika i prochnost' mashin*. – 1999. – Vyp.57. – S. 148–155. 7. Tkachuk N.A. Kombinirovannye raschetno-jeksperimental'nye metody issledovanija proch-nostnyh i zhestkostnyh harakteristik jelementov tehnologicheskikh sistem / N.A. Tkachuk // *Mehanika ta mashinobuduvannja*. – 1999. – №1. – S. 37–46.

Карапейчик І.М., Чепурний А.Д., Ткачук М.А.

#### БАГАТОРІВНЕВІ ГІБРИДНІ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МОДЕЛІ ДЛЯ СИНТЕЗУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті викладено новий підхід до розрахунково-експериментального дослідження елементів спеціальних транспортних засобів. Він базується на сумісному виконанні етапів розрахункових та експериментальних досліджень різних машин однієї серії. Дослідження рознесені у часі та співвідносяться таким чином, що взаємно доповнюють одне одного. Це підвищує адекватність створюваних моделей та достовірність проектних розрахунків елементів нових машин.

Karapeychik I.N., Chepurnoy A.D., Tkachuk N.A.

#### MULTILEVEL HYBRID COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL MODELS FOR PARAMETERS SYNTHESIS OF SPECIAL VEHICLES ELEMENTS

The article describes a new approach to computational and experimental researches of special vehicles elements. It is based on joint implementation of computational and experimental studies of different machines of same series. The study separated in time and correlated in a way that mutually complement each other. This increases the adequacy and accuracy of generated models and validity of project computations of new machines elements.