

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ КЛАССА «БАГГИ» НА ПАРАМЕТРЫ ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

д.т.н. Баженов Е.Е.¹, к.т.н. Буйначев С.К.², Кустовский А.Н.¹

¹Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ)

²Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ)

Kustovsky88@mail.ru

В данной работе приводится методика анализа степени влияния отдельных элементов трубчатой несущей конструкции автомобиля багги на параметры ее напряженно-деформированного состояния. В качестве параметров напряженно-деформированного состояния были выбраны угол закручивания рамы вокруг продольной оси симметрии, а также напряжения в передних верхних углах кокпита (подконструкция, в которой располагается гонщик) рамы. В основе рассматриваемой методики лежит регрессионный анализ, при помощи которого было получены уравнения для расчета указанных выше величин. В силу объемности данных и связанных с этим сложностями с последующим анализом, представленные уравнения предлагается использовать лишь для наиболее важных, с точки зрения расчетчика, элементов отдельных подконструкций рамы. Определение таких элементов может зависеть от опыта расчетчика, его интуиции, а также быть основанной на накопленной ранее сторонней информации. В качестве объекта исследования выступает рама автомобиля повышенной проходимости «багги», используемой для передвижения по пересеченной местности, в частности, в лесном хозяйстве егерями. Расчеты проводились в среде компьютерного моделирования SolidWorks с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: багги, несущая структура, жесткость на кручение, подконструкция, регрессионный анализ.

Введение

Рама автомобиля багги является его основной силовой структурой, которая принимает на себя все нагрузки, возникающие во время движения по труднопроходимым участкам пересеченной местности. Учитывая специфику использования автомобилей подобного класса, в частности, в лесном хозяйстве, можно сделать вывод о наличии широкого спектра самых разнообразных режимов нагружения, которым подвергается рама. В этой связи для разработчика несущей конструкции возникает необходимость определить наиболее часто встречающиеся режимы нагружения и выделить среди них наиболее жесткие с точки зрения возникающих в конструкции напряжений и деформаций. Опытным путем было установлено, что наиболее распространенный и жесткий режим

нагружения рамы автомобиля багги – это режим закручивания вокруг продольной оси.

Цель исследования

Целью проведенных исследований является разработка методики анализа степени влияния отдельных элементов трубчатой несущей конструкции автомобиля багги на параметры ее напряженно-деформированного состояния.

Используемые методы исследования

На рис. 1 представлен объект исследования, а также схема нагружения и закрепления [1]. Внешнее усилие передается на закрепленные неподвижно рычаги подвески, геометрически соответствующие реальным. Таким образом, пара сил создаст закручивающий момент [2],

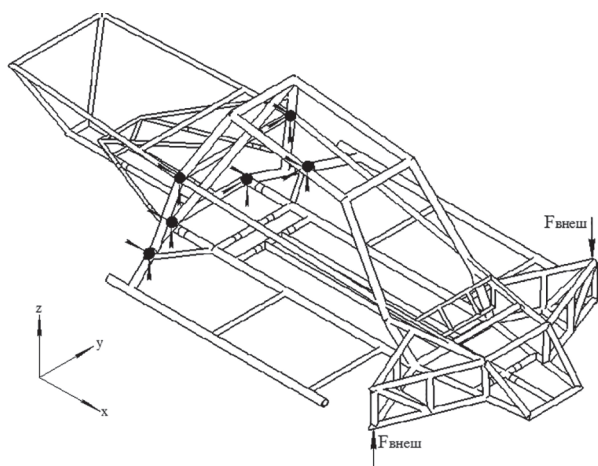


Рис. 1. Схема нагружения и закрепления рамы автомобиля багги

приводящий к деформации кручения рамы. Величина внешнего усилия рассчитывалась из веса неподдресоренных масс, помноженных на коэффициент динамичности 1,3. Данный коэффициент равен среднему значению вертикальных ускорений передних колес во время пробного заезда. Необходимо учитывать, что значение внешнего усилия зависит от конструктивных параметров конкретного автомобиля, а также от характеристик трассы, на которой получены значения ускорений. Также для получения необходимых значений можно использовать методы статистической динамики [3]. Стрелками рядом с черными кружками показаны направления, перемещения в которых ограничиваются.

Полученные результаты

По результатам предварительных исследований были выявлены наиболее нагруженные области данной конструкции. Одной из них являются области в районе передних верхних углов кокпита (рис. 2).

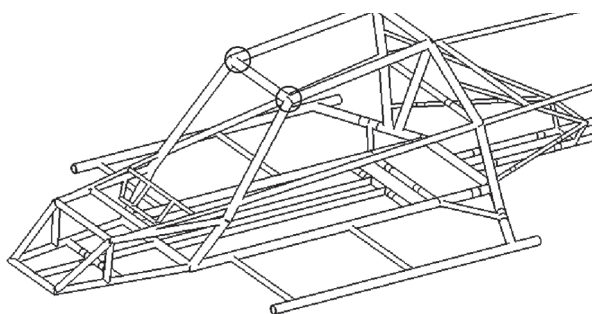


Рис. 2. Области возникновения наибольших напряжений в кокпите (отмечены кругами)

Суммируя накопленную информацию, можно сказать, что указанные на рисунке 2 области являются наиболее нагруженными для рам, аналогичных представленной. В этой связи выбор передних верхних углов кокпита в качестве характерных точек для замера напряжений видится обоснованным.

В качестве другой характерной точки для замера деформации кручения была выбрана точка соединения переднего подрамника и кокпита (рис. 3).

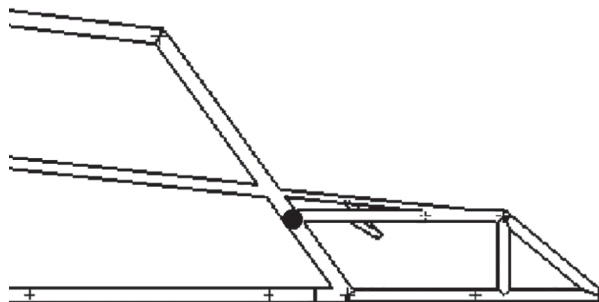


Рис. 3. Характерная точка для замера деформации кручения

Выбор данной точки носит условный характер, и для оценки крутильной жесткости можно выбрать и любую другую точку на раме. Указанная точка была выбрана, потому что она, с одной стороны, располагается в подвергающейся исследованию подконструкции, а с другой стороны, находится на относительно небольшом удалении от действия внешней нагрузки.

Расчет деформации кручения осуществлялся следующим образом (рис. 4).

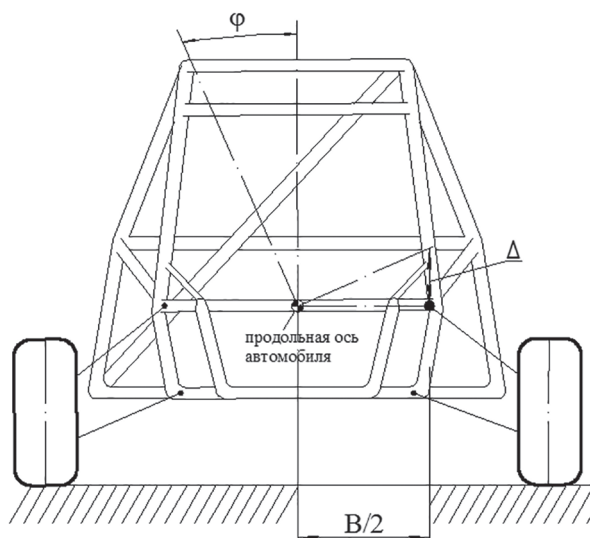


Рис. 4. Схема для определения относительного угла закручивания

Угол φ закручивания рамы равен:

$$\varphi = \arctg \frac{2\Delta}{B}, \quad (1)$$

где φ – вертикальное перемещение произвольной точки на раме, $B/2$ – расстояние от измераемой точки до плоскости продольной симметрии автомобиля.

Таким образом, параметры, определяющие напряженно-деформированное состояние конструкции (НДС), определены.

Ниже в таблице 1 представлены значения факторов и уровни их варьирования.

Связь между значениями нормализованных и натуральных значений факторов определяется при помощи выражения:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\Delta \tilde{x}_i}, \quad (2)$$

где x_i – кодированное текущее значение фактора, $\tilde{x}_{i0}$ – натуральное значение нулевого уровня, $\tilde{x}_i$ – натуральное текущее значение фактора, $\Delta \tilde{x}_i$ – натуральное значение интервала варьирования.

После этого факторы в кодированном виде принимают значения в интервале (-1; 1). Левая граница интервала соответствует наименьшему значению параметра, а правая – наибольшему.

Как видно из таблицы 1, всего было выбрано 5 факторов, которым соответствуют определенные стержни рамы. План эксперимента является полным факторным планом (ПФП) и содержит 32 опыта. Варьирование факторов осуществляется на двух уровнях.

Эксперимент состоит в следующем. В рассматриваемой конструкции (рис. 1) в соответствии с планом эксперимента производится изменения параметров поперечных сечений выбранных стержней (факторы x_1, x_2, x_3, x_4, x_5). Каждый раз проводится измерение возни-

кающих напряжений в углах кокпита (рис. 2), а также угла закручивания рамы. Полученные данные проходят статистическую обработку, после чего формируются регрессионные уравнения первого порядка. Данные уравнения позволяют проводить анализ влияния рассматриваемых стержней на картину напряженно-деформированного состояния рамы.

Выбранные в качестве факторов стержни показаны на рис. 5.

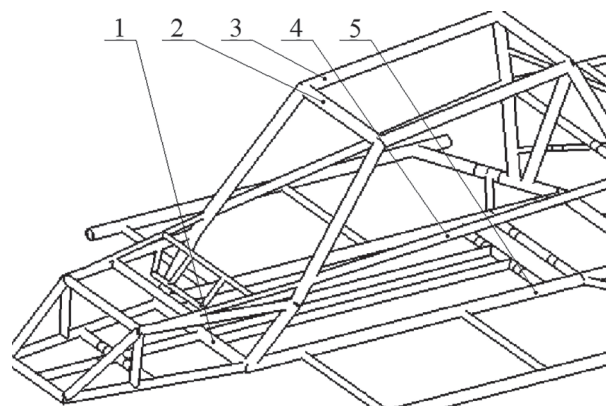


Рис. 5. Выбор стержней для проведения эксперимента

Выбор указанных стержней обусловлен учетом опыта расчета аналогичных конструкций, согласно которому именно выбранные стержни в наибольшей степени формируют жесткость кокпита как отдельной подконструкции. Поэтому изменение параметров их поперечных сечений также должно существенно отражаться на изменении НДС конструкции.

При выборе вида регрессионного уравнения была принята гипотеза о линейной зависимости выходной величины от выбранных факторов. Кроме того, в уравнении содержатся члены, отвечающие за учет взаимовлияния

Таблица 1

Натуральные значения факторов и уровни их варьирования

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьиров.
Нормализ. значение	Натуральн. значение	Верхний (+1)	Средний (0)	Нижний (-1)	
x_1	36x2	40	36	32	4
x_2	36x2	40	36	32	4
x_3	36x2	40	36	32	4
x_4	36x2	40	36	32	4
x_5	36x2	40	36	32	4

факторов. Регрессионное уравнение первой степени имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + \\
 & + b_5 X_5 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + \\
 & + b_{15} X_1 X_5 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{25} X_2 X_5 + \\
 & + b_{34} X_3 X_4 + b_{35} X_3 X_5 + b_{45} X_4 X_5 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + \\
 & + b_{124} X_1 X_2 X_4 + b_{125} X_1 X_2 X_5 + b_{134} X_1 X_3 X_4 + \\
 & + b_{135} X_1 X_3 X_5 + b_{145} X_1 X_4 X_5 + b_{234} X_2 X_3 X_4 + \\
 & + b_{245} X_2 X_4 X_5 + b_{345} X_3 X_4 X_5 + b_{12345} X_1 X_2 X_3 X_4 X_5
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

После реализации плана эксперимента в соответствии с таблицей 1 при помощи методов статистической обработки эксперимента было получено следующее уравнение для угла закручивания в нормализованных значениях:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{кр} = & 1,53 - 0,054 \cdot x_2 - 0,16 \cdot x_3 - \\
 & - 0,06 \cdot x_4 - 0,06 \cdot x_5 - 0,01 \cdot x_2 x_3 + \\
 & + 0,01 \cdot x_2 x_5 + 0,01 \cdot x_3 x_4 + \\
 & + 0,01 \cdot x_3 x_5 + 0,01 \cdot x_4 x_5.
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

и для напряжения в переднем верхнем углу кокпита:

$$\begin{aligned}
 \sigma = & 308,51 - 51,65 \cdot x_2 + 12,78 \cdot x_3 - \\
 & - 9,63 \cdot x_4 - 7,59 \cdot x_5 - 1,22 \cdot x_2 x_3 + \\
 & + 1,56 \cdot x_2 x_4 + 1,99 \cdot x_2 x_5.
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

Таблица 2

Результаты эксперимента и значения по уравнениям регрессии

№ опыта	Среднее значение по опытам		Проверка уравнения		Разница в процентах	
	$\bar{Y}_{фкр}$	$\bar{Y}_{\sigma}$	$\hat{Y}_{фкр}$	$\hat{Y}_{\sigma}$	$\varphi_{кр}$	σ
1	1,22	255,70	1,22	256,28	0,12	0,23
2	1,22	255,75	1,22	257,24	-0,15	0,58
3	1,34	357,75	1,35	356,61	0,36	-0,32
4	1,30	356,80	1,31	355,20	0,63	-0,45
5	1,52	228,80	1,52	231,64	0,14	1,24
6	1,51	228,90	1,52	231,92	1,03	1,32
7	1,59	325,20	1,59	324,84	0,17	-0,11
8	1,58	324,35	1,57	323,41	-0,57	-0,29
9	1,65	244,30	1,65	246,60	-0,11	0,94
10	1,65	244,25	1,65	245,93	-0,22	0,69
11	1,74	348,40	1,72	346,16	-0,98	-0,64
12	1,73	348,80	1,75	349,23	0,94	0,12
13	1,31	269,25	1,31	270,58	0,64	0,49
14	1,30	268,95	1,30	269,81	0,05	0,32
15	1,43	377,70	1,44	376,03	0,53	-0,44
16	1,42	376,35	1,41	373,14	-1,10	-0,85
17	1,65	241,50	1,64	242,58	-1,03	0,45
18	1,64	240,90	1,65	243,58	0,41	1,11
19	1,75	345,25	1,75	344,41	-0,13	-0,24
20	1,74	344,50	1,74	344,16	0,35	-0,10
21	1,22	257,05	1,25	260,06	2,13	1,17
22	1,33	267,00	1,32	267,02	-0,78	0,01
23	1,44	374,50	1,43	371,62	-0,55	-0,77
24	1,44	373,70	1,44	371,47	-0,42	-0,60
25	1,81	259,50	1,81	261,05	-0,09	0,60
26	1,80	258,65	1,80	260,72	-0,19	0,80
27	1,93	371,45	1,92	370,04	-0,67	-0,38
28	1,91	371,00	1,90	368,70	-0,46	-0,62
29	1,43	282,40	1,42	282,52	-0,71	0,04
30	1,42	281,40	1,42	282,16	0,16	0,27
31	1,56	397,50	1,56	394,80	0,22	-0,68
32	1,56	395,60	1,55	392,77	-0,63	-0,72

В таблице 2 представлены значения, вычисленные по уравнениям 4 и 5 в сравнении со значениями, полученными в результате эксперимента.

Полученные уравнения позволяют анализировать изменение изучаемых величин в зависимости от изменения параметров факторов. Как можно заметить, в уравнениях (4) и (5) использовались не все члены уравнения (3). Это связано с тем, что отсутствующие члены по критерию Стьюдента [4] были признаны незначительными. Также можно заметить, что величина напряжений в переднем верхнем углу кокпита зависит от большего количества членов уравнения (3), чем угол закручивания.

Кроме анализа изменения изучаемых величин в зависимости от изменения факторов, полученные уравнения (4) и (5) позволяют оценить вклад отдельных элементов в изменении выходного параметра. Так, к примеру, в уравнении (4) фактор X_3 оказывает заметно большее влияние на угол закручивания, чем фактор X_2 , о чем свидетельствуют числовые коэффициенты перед ними. Это означает, что стержень 3 (рис. 5) оказывает большее влияние на изменение угла закручивания, чем стержень 2. Знак «минус» перед индексом говорит о том, что увеличение диаметра поперечного сечения стержня приводит к снижению угла закручивания кокпита.

Заключение

Проверка адекватности уравнений показала, что расхождение величин, найденных при их помощи с величинами, полученными при эксперименте, лежат в пределах 1,1–2,13%. Таким образом, данные уравнения могут использоваться для анализа исследуемых параметров, а также для решения задач оптимизации для аналогичных конструкций [5].

Литература

1. Tebby S., Esmailzadeh E., Barari A. Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive

Chassis // Computer – Aided Design & Applications. PACE (1), 2011, pp. 67–75.

2. Кудрявцев С.М. Теоретические и экспериментальные исследования кузова современного автомобиля. Нижний Новгород, 2009. 220 с.
3. Барахтанов Л.В., Дмитриев П.Е. Статистические характеристики микропрофиля автомобильных дорог, Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, 2011. 11 с.
4. Александрова О.В., Мацеевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач: учебное пособие / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. М.: МГСУ, 2015. 160 с.
5. Haug E.J., Arora J.S., Applied Optimal Design, Wiley-Interscience, New York, 1979.

References

1. Tebby S., Esmailzadeh E., Barari A. Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive Chassis. Computer – Aided Design & Applications. PACE (1), 2011, 67–75.
2. Kudryavcev S.M. *Teoreticheskie i ehksperimental'nye issledovaniya kuzova sovremennogo avtomobilya* [Theoretical and experimental studies of the body of a modern automobile]. Nizhnij Novgorod. 2009. 220 p.
3. Barahtanov L.V., Dmitriev P.E. *Statisticheskie harakteristiki mikroprofilya avtomobil'nyh dorog* [Statistical characteristics of the micro-profile of highways]. Nizhnij Novgorod. Nizhegorodskij Gosudarstvennyj Tekhnicheskij Universitet Publ.. 2011. 11 p.
4. Aleksandrova O.V., Maceevich T.A., Kir'yanova L.V., Solov'yov V.G. *Statisticheskie metody resheniya tekhnologicheskikh zadach: uchebnoe posobie* [Statistical methods for solving technological problems: a textbook]. M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Mosk. gos. stroit. un-t. Moscow: MGSU Publ., 2015. 160 p.
5. Haug E.J., Arora J.S., Applied Optimal Design, Wiley-Interscience, New York, 1979.

INFLUENCE OF THE ELEMENTS OF THE SPATIAL BEARING SYSTEM OF THE VEHICLE OF INCREASED CROSS-COUNTRY ABILITY OF THE «BUGGY» CLASS ON THE PARAMETERS OF ITS STRESS-STRAIN STATE

Dr.Eng. **E.E. Bazhenov**¹, Ph.D. **S.K. Bujnachev**², **A.N. Kustovskij**¹

¹Ural State Forest Engineering University

²Ural Federal University

Kustovsky88@mail.ru

The technique of the analysis of a degree of influence of separate elements of a tubular bearing structure of the buggy vehicle on parameters of its stress-strain condition is studied in the paper. As parameters of the stress-strain state the angle of twisting of the frame around the longitudinal axis of symmetry, as well as the stress in the front upper corners of the cockpit (the subconstruction where the racer is located), were selected. The considered method is based on the regression analysis, with the help of which the equations for calculating the above values were obtained. Due to the volume of data and the associated difficulties with subsequent analysis, the given equations are proposed to be used only for the most important elements of the individual frame substructures from the point of view of the engineer. The definition of such elements can depend on the experience of the engineer, his intuition, and also on the basis of the previously accumulated third-party information. The object of the study is the frame of the "buggy" cross-country vehicle used for movement on rough terrain, in particular, in forestry by huntsmen. The calculations were carried out in the SolidWorks computer simulation program using the finite element method.

Keywords: buggy, supporting structure, torsional rigidity, subconstruction, regression analysis.