

УДК 519.876.5

doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-29-36

Верификация программных комплексов на примере статически определимой призматической балки

А.М. Кашкевич¹, Ю.В. Баданина², А.С. Филимонов², А.И. Долгих²

¹ ПАО «Криогенмаш»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Verification of software systems on the example of a statically definable prismatic beam

A.M. Kashkevich¹, Yu.V. Badanina², A.S. Filimonov², A.I. Dolgikh²

¹ PJSC Cryogenmash

² Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены вопросы верификации программных комплексов — проверки соответствия результатов программной системы требованиям и ограничениям — для призматической балки. Проверка осуществлена на тестовом примере, в качестве которого выбран расчет перемещения статически определимой призматической балки с одной жесткой заделкой под действием поперечной нагрузки. Проведен аналитический расчет перемещений статически определимой призматической балки, получен ее график изгиба. Форма кривой изгиба найдена с помощью интегрирования дифференциального уравнения упругой линии балки. Рассчитано максимальное перемещение на краю балки. Выполнено сравнение данных, полученных аналитическим способом и с помощью разных программных комплексов, в которых задача решена методом конечных элементов. Указаны достоинства и недостатки программных комплексов ANSYS и SolidWorks. Результаты исследования свидетельствуют о точности проведенных инженерных расчетов.

Ключевые слова: верификация программных комплексов, призматическая балка, ANSYS и SolidWorks

The paper considers issues of verifying software systems on the example of a prismatic beam. Verification refers to checking the software system results compliance with requirements and constraints. Verification was carried out on a test example, which was selected as calculation of displacements of a statically determined beam with one rigid attachment under the action of a transverse load. Analytical calculation of the statically determined prismatic beam displacement was performed, and its bending curve was obtained. The bending curve shape was found by integrating the beam elastic line differential equation. Maximum displacement at the beam edge was calculated. Results of the analytical method verification calculations were compared with data obtained using different software systems, where the problem was solved by the finite element method. Advantages and disadvantages of the ANSYS and SolidWorks software systems were indicated. The obtained results testify to accuracy of the performed engineering calculations.

Keywords: software system verification, prismatic beam, ANSYS and SolidWorks

Информационные технологии занимают главенствующее положение в управлении непроводимыми современными системами. Любая информационная система состоит из аппаратного и программного обеспечения, сложность которого приводит к увеличению количества ошибок в нем. Чтобы обеспечить корректность и надежность работы таких систем, необходимо провести верификацию программных комплексов (ПК). Верификация — это подтверждение правильности какого-либо действия, предмета или события после проверки [1–3].

Цель работы — проверить качество ПК ANSYS и SolidWorks на выбранном верифицируемом объекте.

Проверку проводили на тестовом примере, в качестве которого выбрали расчет перемещений статически определимой призматической балки (далее балка) с одной жесткой заделкой под действием поперечной нагрузки (рис. 1). Балка длиной $L = 500$ мм имела следующие линейные размеры в сечении: $B = 10$ мм и $H = 20$ мм. Поперечная сила в направлении, противоположном положительному направлению оси z , $F = 500$ Н. Материал балки — сталь 45 с модулем упругости $E = 200$ ГПа.

Аналитический расчет. Форму кривой изгиба найдем, интегрируя дифференциальное уравнение упругой линии балки следующим образом:

$$\frac{1}{\rho} z'' = \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{M_y(x)}{EI_y};$$

$$v(x) = z' = \frac{dz}{dx} = \int_0^x \frac{M_y(x)}{EI_y} dx + C_1;$$

$$w(x) = z = \int_0^x \int_0^x \frac{M_y(x)}{EI_y} dx dx + C_1 x + C_2.$$

Здесь $1/\rho$ — кривизна балки; M_y — изгибающий момент, Н·м; I_y — момент инерции сечения, м⁴; C_1, C_2 — коэффициенты, зависящие от граничных условий:

- $w(0) = 0$, так как балка закреплена посредством заделки, блокирующей перемещения и прогибы, а значит, $C_2 = 0$;

- $v(0) = 0$, следовательно, $C_1 = 0$.

С учетом этого уравнение изгиба балки приобретает вид

$$w(x) = \int_0^x \int_0^x \frac{M_y(x)}{EI_y} dx dx.$$

Для построения эпюры перемещений определим функцию изгибающего момента с помощью уравнений равновесия на участке x_1 (см. рис. 1):

$$\sum F_z = 0: Q_z - F = 0 \rightarrow Q_z = F = \text{const};$$

$$\sum M_y = 0: -M_y - Fx_1 = 0 \rightarrow M_y = -Fx_1,$$

где $\sum F_z$ — сумма сил, Н.

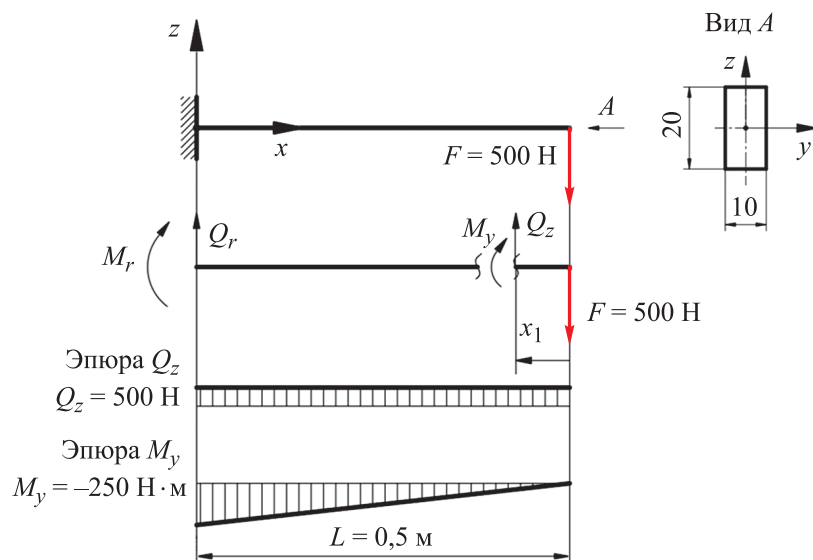


Рис. 1. Схема расчета перемещений балки под действием поперечной нагрузки:

Q_z — поперечная сила, Н;

Q_r — поперечная сила реакции опоры, Н;

M_r — изгибающий момент реакции опоры, Н·м

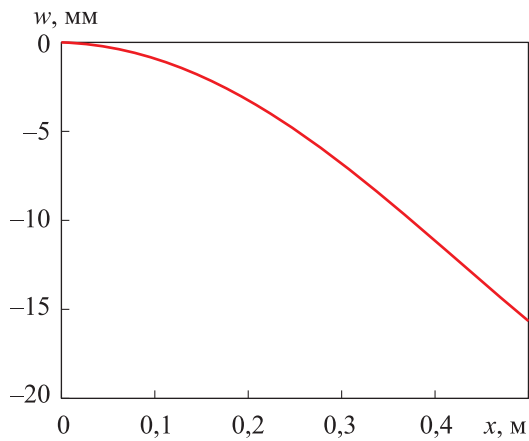


Рис. 2. Зависимость перемещения балки w от расстояния x , полученная аналитическим путем с помощью ПК MathCAD

Для $X_1 = 0$, $M_y = 0$, а для $X_1 = L$, $M_y = -FL = -250 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Тогда

$$M_y(x) = -FL + Fx = 500(x - 0,5), \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

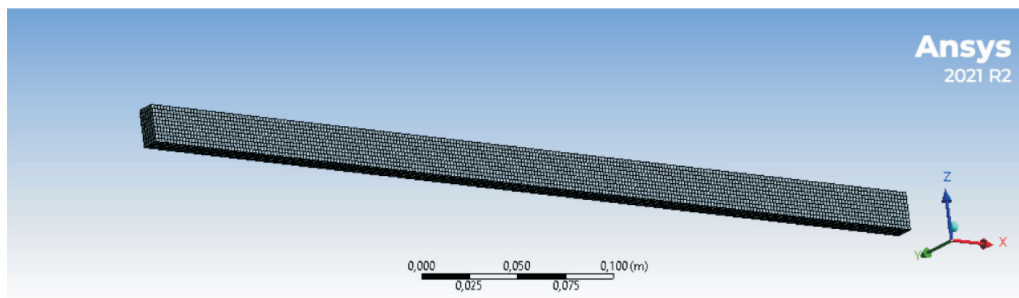
Момент инерции прямоугольного сечения определим следующим образом:

$$I_y = \frac{BH^3}{12} = \frac{0,01 \cdot 0,02^3}{12} = 6,667 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4.$$

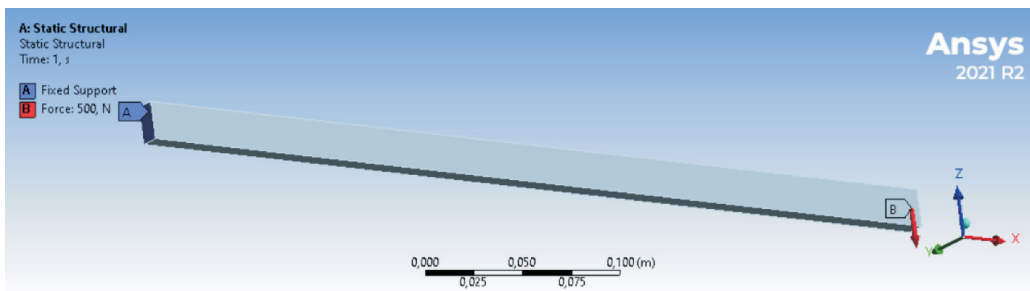
Тогда формула для вычисления перемещения балки примет вид

$$w(x) = \int_0^x \int_0^x \frac{500(x-0,5)}{2 \cdot 10^{11} \cdot 6,667 \cdot 10^{-9}} dx dx.$$

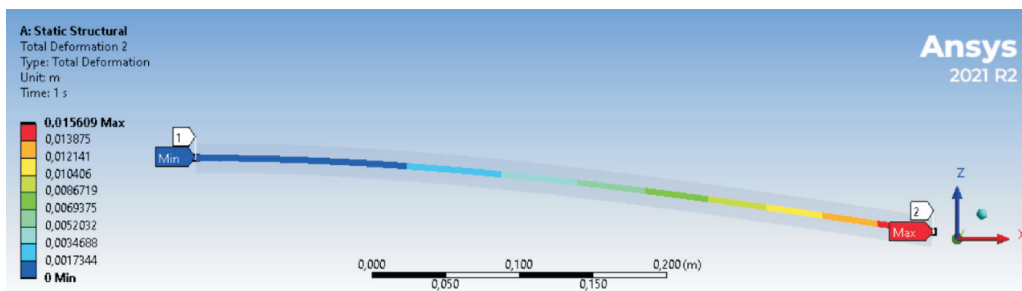
График изгиба балки в виде зависимости ее перемещения w от расстояния x , полученной аналитическим путем с помощью ПК MathCAD, показан на рис. 2 [4].



а



б



в

Рис. 3. Результаты расчета, выполненного в ПК ANSYS:
 а — конечно-элементная модель балки; б — схема приложения граничных условий и нагрузок;
 в — эпюра перемещений, m , среднего сечения балки под действием поперечной нагрузки

На краю балки наблюдается ее максимальное перемещение

$$w_{\max} = w(0,5) = \int_0^{0,5} \int_0^{0,5} \frac{500(x-0,5)}{2 \cdot 10^{11} \cdot 6,667 \cdot 10^{-9}} dx dx = -0,015625 \text{ м.}$$

Расчет в ПК ANSYS. Одним из самых популярных программных решений, позволяющих выполнять автоматизированные расчеты при проектировании и конструировании изделий разной сложности, является ПК ANSYS.

Поставленную задачу решали в ПК ANSYS методом конечных элементов, задавая материал, геометрические параметры, форму и ее сетчатое представление с гексагональными элементами размером 2 мм (рис. 3, а), граничные условия (рис. 3, б). Полученная эпюра перемещений среднего сечения балки под действием поперечной нагрузки приведена на рис. 3, в [5–7].

Расчет в ПК SolidWorks. Еще одним не менее популярным ПК, предназначенным для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической

подготовки производства, является SolidWorks.

Как и в ПК ANSYS, в ПК SolidWorks выполняли построение конечно-элементной модели с граничными условиями и рассчитывали эпюру перемещения среднего сечения балки под действием поперечной нагрузки (рис. 4) [8–10].

Обсуждение результатов. Для проверки правильности полученных данных проведено сравнение результатов, полученных разными способами. Зависимости перемещения балки под действием поперечной нагрузки от расстояния x , полученные аналитическим путем с помощью программы MathCAD и рассчитанные в ПК ANSYS и SolidWorks, приведены на рис. 5. Видно, что форма графика на основе теоретического расчета и отображение программных эпюр перемещений совпадают, разброса значений и заметных отклонений не наблюдается [11–15].

Значения перемещения балки под действием поперечной нагрузки, найденные разными способами с шагом измерения 0,025 м, приведены в таблице, где w , w_{ANS} и w_{SW} — перемещение балки, рассчитанное аналитическим способом,

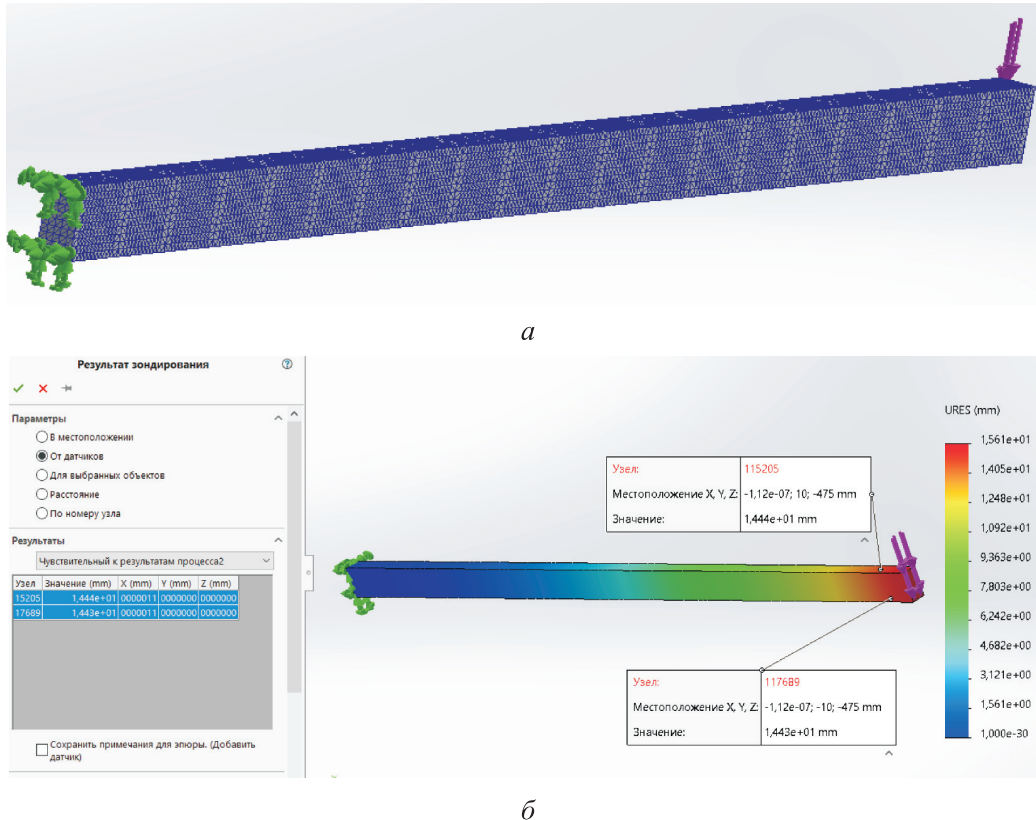


Рис. 4. Результаты расчета в ПК SolidWorks:

а — задание параметров конечно-элементной сетки модели; б — измеренные перемещения, мм, среднего сечения балки под действием поперечной нагрузки

в ПК ANSYS и SolidWorks соответственно. Там же указаны ошибки — отклонения в измерениях ПК от аналитических значений, вычисленные по следующим формулам:

$$\Delta_{ANS} = \frac{w - w_{ANS}}{w} \cdot 100 \%;$$

$$\Delta_{SW} = \frac{w - w_{SW}}{w} \cdot 100 \%,$$

где w_{ANS} и w_{SW} — перемещение балки, рассчитанное с помощью ПК ANSYS и SolidWorks.

Из таблицы следует, что при максимальном перемещении балки w_{max} ошибка для программы ANSYS $\Delta_{ANS} = 0,102 \%$, что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности инженерных расчетов. Среднее значение ошибки по всем сечениям составило $0,361 \%$.

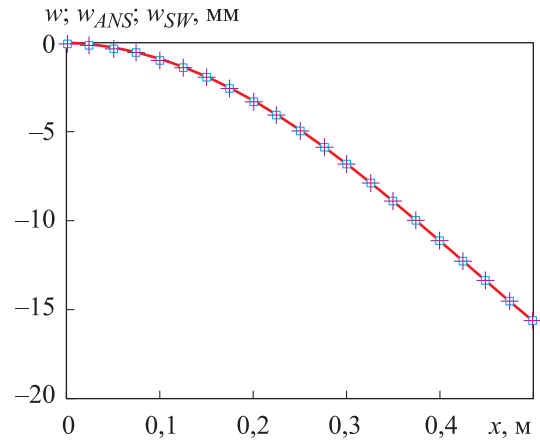


Рис. 5. Зависимости перемещения балки под действием поперечной нагрузки от расстояния x , полученные аналитическим путем w (—) и с помощью ПК ANSYS w_{ANS} (□) и SolidWorks w_{SW} (+)

Результаты расчета перемещения сечений балки, полученные разными способами

Номер сечения	Расстояние x , м	Перемещение, м			Ошибка, %	
		w_{ANS}	w_{SW}	w	Δ_{ANS}	Δ_{SW}
0	0	0	0	0	–	–
1	0,025	–0,000056	–0,000074	–0,000058	2,759	–27,586
2	0,050	–0,000225	–0,000244	–0,000227	0,881	–7,489
3	0,075	–0,000498	–0,000517	–0,000501	0,599	–3,194
4	0,100	–0,000871	–0,000889	–0,000875	0,343	–1,600
5	0,125	–0,001339	–0,001355	–0,001343	0,372	–0,894
6	0,150	–0,001893	–0,001909	–0,001898	0,263	–0,580
7	0,175	–0,002530	–0,002545	–0,002536	0,237	–0,355
8	0,200	–0,003244	–0,003257	–0,003250	0,185	–0,215
9	0,225	–0,004027	–0,004039	–0,004034	0,174	–0,124
10	0,250	–0,004875	–0,004885	–0,004883	0,164	–0,041
11	0,275	–0,005781	–0,005790	–0,005792	0,190	0,035
12	0,300	–0,006741	–0,006748	–0,006750	0,133	0,030
13	0,325	–0,007747	–0,007753	–0,007757	0,129	0,052
14	0,350	–0,008794	–0,008798	–0,008805	0,125	0,080
15	0,375	–0,009876	–0,009879	–0,009888	0,121	0,091
16	0,400	–0,010987	–0,010990	–0,011000	0,118	0,091
17	0,425	–0,012122	–0,012120	–0,012136	0,115	0,132
18	0,450	–0,013275	–0,013270	–0,013289	0,105	0,143
19	0,475	–0,014439	–0,014435	–0,014454	0,104	0,131
20	0,500*	–0,015609	–0,015615	–0,015625	0,102	0,064

* Максимальное значение w_{max} .

Результаты, полученные в ПК SolidWorks с ошибкой $\Delta_{sw} = 0,064$ %, отображают максимальное перемещение балки, что практически в 2 раза корректнее, чем вычисленное в ПК ANSYS. Однако среднее значение ошибки по всем сечениям составило 2,061 %.

Вывод

Результаты расчета перемещений балки, полученные в ПК ANSYS, удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к инженерным вычислениям.

Авторы выражают благодарность Р.С. Роголёву и А.С. Свешникову за помощь в некоторых аспектах проведенного исследования и оформлении рукописи.

Литература

- [1] Кулямин В.В. *Методы верификации программного обеспечения*. Москва, ИСП РАН, 2008. 117 с.
- [2] Кларк Э., Грамберг О., Пелед Д. *Верификация моделей программ. Model checking*. Москва, МЦНМО, 2002. 416 с.
- [3] Boehm B.W. *Software engineering economics*. Prentice-Hall, 1981. 767 p.
- [4] Jie Y., Yuan H., Zhou H. et al. Bending moment calculations for piles based on the finite element method. *J. Appl. Math.*, 2013, vol. 2013, art. 784583, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/784583>
- [5] Boldyrev G., Muzyemnek A.J. The modelling of deformation process in soils with use of Ansys and Ls-Dyna programs. *6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 2008, pp. 1–10.
- [6] Атакулов Л.Н., Истаблаев Ф.Ф. Решение задач методом конечных элементов с помощью программного комплекса Ansys. *Горный вестник Узбекистана*, 2015, № 2, с. 53–56, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34114.91841>
- [7] Muhammad A., Ali M., Shanono I. Finite element analysis of a connecting rod in ANSYS: an overview. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 736, art. 022119, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022119>
- [8] Hammood A., Helayel M., Karaisi R. et al. Effect of different natural composite material lyses on structural analysis of aircraft body. *JMERD*, 2021, vol. 44, no. 5, pp. 339–344.
- [9] Князьков В.В., Фазлулин Э.М. Геометрическое моделирование в SolidWorks. *Известия МГТУ МАМИ*, 2014, т. 8, № 1, с. 170–176, doi: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67541>
- [10] Князьков В.В., Фазлулин Э.М. Моделирование и инженерный анализ в интегрированной среде SolidWorks/COSMOSWorks. *Мат. межд. науч.-тех. конф. ААИ Авто-мобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров*. Москва, МГТУ МАМИ, 2010, с. 60–66.
- [11] Копуяхов А.В. *Основы анализа конструкций в ANSYS*. Казань, КГУ, 2001. 101 с.
- [12] Пнева М.А., Усова К.С., Курохтин В.Ю. Расчет элементов строительных конструкций на прочность с использованием программных комплексов и аналитических методов. *III Межд. конф. молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций*, 2019, с. 377–382.
- [13] Штаничев Р.А., Яблоков А.М., Садовский Н.И. Верификации результатов численного моделирования малорасходной ступени центробежного компрессора с экспериментальными данными с помощью программных комплексов Numeca Fine/Turbo и Ansys CFX. *Вестник Международной академии холода*, 2021, № 3, с. 32–38, doi: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-3-32-38>
- [14] Thacker B., Doebling S.W., Hemez F. et al. Concepts of model verification and validation, 2004, doi: <https://doi.org/10.2172/835920>
- [15] Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Каюков С.С. и др. Расчет на прочность элементов ДВС с помощью Ansys с учётом тепловых процессов в камере сгорания. *Вестник Самарского Государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*, 2015, т. 4, № 2, с. 35–45, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-35-43>

References

- [1] Kulyamin V.V. *Metody verifikatsii programmnoy obespecheniya* [Methods of software verification]. Moscow, ISP RAN Publ., 2008. 117 p. (In Russ.).
- [2] Clarke E.M., Grumberg O., Peled D. *Model checking*. MIT Press, 1999. 314 p. (Russ. ed.: *Verifikatsiya modeley programm. Model checking*. Moscow, MTsNMO Publ., 2002. 416 p.)
- [3] Boehm B.W. *Software engineering economics*. Prentice-Hall, 1981. 767 p.
- [4] Jie Y., Yuan H., Zhou H. et al. Bending moment calculations for piles based on the finite element method. *J. Appl. Math.*, 2013, vol. 2013, art. 784583, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/784583>
- [5] Boldyrev G., Muzyemnek A.J. The modelling of deformation process in soils with use of Ansys and Ls-Dyna programs. *6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 2008, pp. 1–10.
- [6] Atakulov L.N., Istablaev F.F. Solving problems using finite elements method with Ansys software. *Gornyy vestnik Uzbekistana*, 2015, no. 2, pp. 53–56, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34114.91841> (in Russ.).
- [7] Muhammad A., Ali M., Shanono I. Finite element analysis of a connecting rod in ANSYS: an overview. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 736, art. 022119, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022119>
- [8] Hammood A., Helayel M., Karaisi R. et al. Effect of different natural composite material lyses on structural analysis of aircraft body. *JMERD*, 2021, vol. 44, no. 5, pp. 339–344.
- [9] Knyazkov V.V., Fazlulin E.M. Geometrical modeling in SolidWorks. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2014, vol. 8, no. 1, pp. 170–176, doi: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67541> (in Russ.).
- [10] Knyazkov V.V., Fazlulin E.M. [Modelling end engineering analysis in SolidWorks/COSMOSWorks integrated media]. *Mat. mezhd. nauch.-tekhn. konf. AAI Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovki kadrov* [Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. AAI Automobile and Tractor Building in Russia: Priorities of Development and Staff Training]. Moscow, MGTU MAMI Publ., 2010, pp. 60–66. (In Russ.).
- [11] Konyukhov A.V. *Osnovy analiza konstruksiy v ANSYS* [Fundamentals of Construction analysis in ANSYS]. Kazan, KGU Publ., 2001. 101 p. (In Russ.).
- [12] Pneva M.A., Usova K.S., Kurokhtin V.Yu. [Calculation of elements of construction structures for strength using software complexes and analytical methods]. *III Mezhd. konf. molodykh uchenykh po sovremennym problemam materialov i konstruksiy* [III Int. Conf. of Young Scientists on Modern Problems of Materials and constructions], 2019, pp. 377–382. (In Russ.).
- [13] Shtanichev R.A., Yablokov A.M., Sadovskiy N.I. Verification of numerical simulation results for low-flow centrifugal compressor stage with experimental data by Numeca Fine/Turbo and Ansys CFX software packages. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of International Academy of Refrigeration], 2021, no. 3, pp. 32–38, doi: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-3-32-38> (in Russ.).
- [14] Thacker B., Doebling S.W., Hemez F. et al. *Concepts of model verification and validation*, 2004, doi: <https://doi.org/10.2172/835920>
- [15] Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kayukov S.S. et al. Strength analysis of internal combustion engine elements by using Ansys with taking into account heat processes in the combustion chamber. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2015, vol. 4, no. 2, pp. 35–45, doi: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-35-43> (in Russ.).

Информация об авторах

КАШКЕВИЧ Антон Михайлович — директор направления «Космическая и специальная продукция». ПАО «Криогенмаш» (143907, Московская область, Балашиха, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 67, e-mail: a.kashkevich1@omzglobal.com).

БАДАНИНА Юлия Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: badanina@bmstu.ru).

ФИЛИМОНОВ Алексей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexf@bmstu.ru).

ДОЛГИХ Анна Игоревна — кандидат философских наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a.dolgikh@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кашкевич А.М., Баданина Ю.В., Филимонов А.С., Долгих А.И. Верификация программных комплексов на примере статически определимой призматической балки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 29–36, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-29-36

Please cite this article in English as:

Kashkevich A.M., Badanina Yu.V., Filimonov A.S., Dolgikh A.I. Verification of software systems on the example of a statically definable prismatic beam. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 5, pp. 29–36, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-29-36

Information about the authors

KASHKEVICH Anton Mikhailovich — Director, Department of Space and Special Products. PJSC Cryogenmash (143907, Moscow region, Balashikha, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 67, e-mail: a.kashkevich1@omzglobal.com).

BADANINA Yulia Vladimirovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: badanina@bmstu.ru).

FILIMONOV Alexey Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: alexf@bmstu.ru).

DOLGIKH Anna Igorevna — Candidate of Science (Philosophy), Associate Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: a.dolgikh@bmstu.ru).