

Выбор систем автоматизированного проектирования по критерию функциональной полноты

Э.Ю. Воронова, Д.М. Жевакин, О.Н. Сериков, С.В. Щербаков

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: Приведен обзор современных средств автоматизированного проектирования технических систем. При помощи методики сравнения систем по критерию функциональной полноты проанализированы их основные функциональные возможности, соответствие стандартам и дополнительные специализированные приложения. Показано, насколько принятые к сравнению системы автоматизированного проектирования обладают различиями или сходством по критерию функциональной полноты. На основе формализованного анализа функциональной полноты произведен выбор системы Autodesk Inventor для разработки и исследования новой конструкции механизма перемещения проходческого взрывонавалочного комплекса. Сделан предварительный анализ запаса прочности, определен коэффициент запаса прочности металлоконструкции.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, анализ функциональной полноты, формализованный анализ, трехмерное моделирование, анимация, граф превосходства, граф подобия, граф поглощения.

Введение

В Шахтинском автодорожном институте (филиале) ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова ведется разработка инновационного технического решения – агрегатированного проходческого взрывонавалочного комплекса ПКВН [1, 2], базирующегося на специальном перегружателе с клиновыми тягово-транспортными элементами [3]. В частности, в настоящее время разрабатывается новая конструкция механизма перемещения, которая должна отвечать специфике работы комплекса в условиях применения взрывонавалочной технологии проведения подземных горных выработок. Целью выполняемой работы является обоснование конструктивных, кинематических и силовых параметров механизма перемещения, обеспечивающего заданную траекторию движения. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, важнейшей из которых является разработка конструктивного решения механизма перемещения в

совокупности с опорной рамой комплекса, имеющих оптимальные параметры с учетом критических нагрузок. Решение этой задачи подразумевает оптимизацию конструкции, исследование ее на прочность в различных режимах работы и т.д.

Для эффективного решения данной задачи целесообразно воспользоваться возможностями автоматизированного проектирования, которое в последние десятилетия получило весьма широкое распространение. Для этого необходимо осуществить обоснованный выбор системы автоматизированного проектирования (САПР), обладающей необходимыми функциями.

В общем случае выбор САПР, особенно для решения задач по трехмерному моделированию твердотельных объектов, является непростой задачей. Критерии выбора могут быть различными, т. к. зависят от целой совокупности факторов: требования конкретного заказчика, вид и сложность поставленной задачи, сроки выполнения проекта, навыки и количество пользователей.

Несмотря на обилие вполне объективных критериев выбора, первостепенным из них является набор функциональных возможностей системы, который в свою очередь может характеризоваться критерием функциональной полноты [4-6]. Этот критерий используется для оценки широкого спектра технических продуктов различного назначения [7-10].

Выбор САПР на основе формализованного анализа функциональной полноты

По сложности и масштабу решаемых задач, в частности, в области машиностроения, системы автоматизированного проектирования, относят к трем основным категориям: легкие (базовые), назначение которых ограничивается, как правило, 2D-проектированием и черчением; средние, которые имеют трехмерные параметрические возможности; тяжелые,

аналогичные по функционалу средним системам, но характеризующиеся существенными отличиями в алгоритмах работы и архитектуре, позволяющими работать с большими сборками в авиастроении, кораблестроении и т.д., а также высокой стоимостью.

Задача по разработке и исследованию механизма перемещения комплекса ПКВН, поставленная в начале данной статьи, имеет невысокую степень сложности, поэтому для ее решения отсутствует необходимость в использовании тяжелой САПР. Тем не менее, перечень необходимых функций выбираемой системы должен включать 3D-моделирование, выполнение прочностных расчетов, автоматизацию процесса проектирования гидравлических систем, рамных конструкций, электрических и других вспомогательных систем, генерацию форм, анализ кинематики и др. Перечень этих функций существенно шире возможностей, которыми обладают САПР, относящиеся к категории легких. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо использовать среднюю САПР.

Для анализа функциональных возможностей средних САПР использованы материалы, размещенные в открытом доступе в сети Интернет (документация, описания функционала систем и т.д.). Следует отметить, что анализировалось только наличие функциональных возможностей, без детализации уровня их проработки, масштаба и принципов реализации.

Введем следующие обозначения:

$Z = \{Z_i\}$ ($i = 1, \dots, 7$) – множество сравниваемых САПР;

$R = \{R_j\}$ ($j = 1, \dots, 25$) – множество функций, реализуемых системами $\{R_j\}$;

$X = \{x_{ij}\}$ ($i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 25$) – матрица сравнения по функциональной

полноте. Ее элементы (табл. 2) определяются следующим образом:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я функция реализуется } i\text{-ой системой} \\ 0, & \text{если не реализуется.} \end{cases}$$

Таблица № 1

Перечень анализируемых САПР

Обозначение	Наименование	Источник информации
Z ₁	Autodesk Inventor	https://www.pointcad.ru/product/autodesk-inventor/podrobnoe-opisanie-autodesk-inventor
Z ₂	SolidWorks	https://3ddevice.com.ua/blog/3d-printer-obzor/obzor-programmy-solidworks/ , https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks
Z ₃	Solid Edge	https://ru.wikipedia.org/wiki/Solid_Edge
Z ₄	Компас-3D	https://ascon.ru/products/7/review/
Z ₅	T-FLEX	https://tflex.ru/about/publications/detail/index.php?ID=2327
Z ₆	Fusion 360	https://fusion-360.ru/features.php
Z ₇	Onshape	http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17571

Таблица № 2

Анализ функциональной полноты систем автоматизированного проектирования

№ функции	Наименование функции	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇
1	2	3	4	5	6	7	8	9
R ₁	2D-черчение	1	1	1	1	1	1	1
R ₂	Создание 3D-моделей сложных форм	1	1	1	1	1	1	1
R ₃	Параметрическое моделирование	1	1	1	1	1	1	0
R ₄	Использование сеточных моделей	0	1	0	0	0	1	0
R ₅	Моделирование сборки	1	1	1	1	1	1	1
R ₆	Библиотеки компонентов	1	1	1	0	1	1	1
R ₇	Ускорители проектирования	1	1	0	0	0	0	0
R ₈	Генератор рам	1	1	1	1	0	0	0
R ₉	Проектирование трубопроводов	1	1	1	1	0	0	0
R ₁₀	Проектирование деталей из листового материала	1	1	1	1	0	0	0

Продолжение таблицы № 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_{11}	Сварные соединения	1	1	1	0	1	0	0
R_{12}	Генератор форм	1	0	0	0	0	0	0
R_{13}	Создание пресс-форм	1	1	0	0	1	0	1
R_{14}	Создание литейных форм	1	1	0	1	1	0	1
R_{15}	Работа с большими сборками	1	1	1	1	1	1	1
R_{16}	Анализ кинематики	1	1	1	0	1	1	1
R_{17}	Прочностной анализ методом конечных элементов	1	1	1	0	1	1	0
R_{18}	Создание двухмерных чертежей	1	1	1	1	1	1	1
R_{19}	Создание сборочных руководств и иллюстраций	1	1	1	1	1	0	0
R_{20}	Фотореалистичная визуализация	1	1	1	1	1	1	1
R_{21}	Создание анимации	1	1	1	0	1	1	1
R_{22}	Обмен данными с другими САПР	1	1	0	1	0	0	1
R_{23}	Импорт/экспорт файлов (DWG, DXF и пр.)	1	1	1	1	1	1	1
R_{24}	Поддержка ЕСКД при проектировании и оформлении документации	1	1	1	1	1	0	0

По данным табл. 2, согласно методике [4-6], проведем расчет матриц $P^{(01)} = \{p_{ik}^{(01)}\}$, $G = \{g_{ik}\}$, $H = \{h_{ik}\}$ ($i, k \in \overline{1, n}$). Полученные с помощью инструментария [6] матрицы:

$$P_{ik}^{(01)} = \begin{matrix}
 \begin{matrix} 0 & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0.840 & 0.708 & 0.583 & 0.695 & 0.500 & 0.565 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.840 & 1 & 0.791 & 0.667 & 0.708 & 0.583 & 0.583 \\
 5 & 5 & 0 & 2 & 2 & 1 & 3 & 0.708 & 0.791 & 1 & 0.667 & 0.714 & 0.650 & 0.500 \\
 8 & 8 & 5 & 0 & 6 & 5 & 4 & 0.583 & 0.667 & 0.667 & 1 & 0.500 & 0.428 & 0.500 \\
 6 & 7 & 4 & 5 & 0 & 2 & 2 & 0.695 & 0.708 & 0.714 & 0.500 & 1 & 0.631 & 0.631 \\
 10 & 10 & 6 & 7 & 5 & 0 & 3 & 0.500 & 0.583 & 0.650 & 0.428 & 0.631 & 1 & 0.647 \\
 9 & 10 & 8 & 6 & 5 & 3 & 0 & 0.565 & 0.583 & 0.500 & 0.500 & 0.631 & 0.647 & 1
 \end{matrix}
 \end{matrix} ; G_{ik} = \begin{matrix}
 \begin{matrix} 1 & 0.840 & 0.708 & 0.583 & 0.695 & 0.500 & 0.565 \\
 0.840 & 1 & 0.791 & 0.667 & 0.708 & 0.583 & 0.583 \\
 0.708 & 0.791 & 1 & 0.667 & 0.714 & 0.650 & 0.500 \\
 0.583 & 0.667 & 0.667 & 1 & 0.500 & 0.428 & 0.500 \\
 0.695 & 0.708 & 0.714 & 0.500 & 1 & 0.631 & 0.631 \\
 0.500 & 0.583 & 0.650 & 0.428 & 0.631 & 1 & 0.647 \\
 0.565 & 0.583 & 0.500 & 0.500 & 0.631 & 0.647 & 1
 \end{matrix}
 \end{matrix}$$

	1	0.954	0.772	0.636	0.727	0.545	0.590
	0.875	1	0.791	0.667	0.708	0.583	0.583
	0.894	1	1	0.736	0.789	0.684	0.578
H_{ik}	0.875	1	0.875	1	0.687	0.562	0.625
	0.941	1	0.882	0.647	1	0.705	0.705
	0.857	1	0.928	0.642	0.857	1	0.785
	0.928	1	0.785	0.714	0.857	0.785	1

Получим логические матрицы отношения поглощения (включения) путем преобразования матриц $P_{ik}^{(01)}$, G_{ik} , H_{ik} при пороговых значениях $\varepsilon_p = 9$; $\varepsilon_g = 0,70$ $\varepsilon_h = 0,90$ соответственно [5,6]:

$$P_o = \{p_{ik}^o\}, G_o = \{g_{ik}^o\}, H_o = \{h_{ik}^o\} \quad (i, k \in \overline{1, n}),$$

$$p_{ik}^o = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{ik}^{(01)} \leq \varepsilon_p \text{ и } i \neq k; \\ 0, & \text{если } P_{ik}^{(01)} > \varepsilon_p \text{ или } i = k; \end{cases} \quad g_{ik}^o = \begin{cases} 1, & \text{если } g_{ik} \geq \varepsilon_g \text{ и } i \neq k; \\ 0, & \text{если } g_{ik} < \varepsilon_g \text{ или } i = k; \end{cases}$$

$$h_{ik}^o = \begin{cases} 1, & \text{если } h_{ik} \geq \varepsilon_h \text{ и } i \neq k; \\ 0, & \text{если } h_{ik} < \varepsilon_h \text{ или } i = k; \end{cases}$$

где ε_p , ε_g , ε_h – выбранные граничные значения.

При $\varepsilon_p = 9$; $\varepsilon_g = 0,70$ $\varepsilon_h = 0,90$ получаем следующий вид матриц:

$$P_o^{(01)} = \begin{matrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0; \end{matrix} \quad G_o = \begin{matrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0; \end{matrix} \quad H_o = \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Графы, построенные по матрицам P_o , G_o и H_o , наглядно показывают различия функциональных возможностей рассматриваемых систем. По графу превосходства (рис. 1, а), видно, какие из сравниваемых систем и насколько превосходят друг друга. При пороговом значении $\varepsilon_p = 9$, системы S_1 и S_2 обладают наибольшей функциональной полнотой, превосходя системы S_6 и

S_7 . Система S_2 превосходит системы S_6 и S_7 , система S_1 также превосходит S_6 , остальные системы не имеют взаимного превосходства.

По матрице $G = \{g_{ik}\}$ можно оценить, насколько рассматриваемые САПР схожи по функционалу. Граф подобия между анализируемыми системами (рис. 1, б) построен по матрице G_0 для порогового значения $\varepsilon_g = 0,70$. Граф иллюстрирует, что системы S_1, S_2, S_6, S_7 имеют наиболее высокую степень подобия – более 70%. Степень подобия между собой остальных систем – менее 70%, поэтому они в графе не имеют взаимных связей.

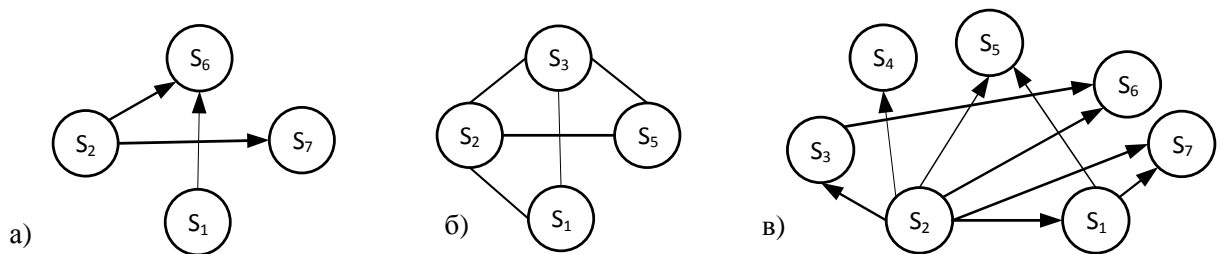


Рис. 1. – Граф превосходства при $\varepsilon_p = 9$ (а), граф подобия при $\varepsilon_g = 0,70$ (б) и граф поглощения при $\varepsilon_h = 0,90$ (в)

На основе матрицы H_0 построен граф поглощения (рис. 1, в), для порогового значения $\varepsilon_h = 0,90$. Из рисунка видно: система S_2 поглощает все другие системы – $S_1, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7$, кроме того система S_1 поглощает системы S_5 и S_7 .

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что среди рассмотренных САПР система SolidWorks обладает наибольшей функциональной полнотой и, следовательно, позволяет решать наиболее широкий круг проектных задач. На втором месте по функциональной полноте находится система Autodesk Inventor.

Тем не менее, для решения сформулированной в начале статьи задачи по оптимизации конструкции механизма перемещения в совокупности с опорной рамой комплекса ПКВН с последующим исследованием ее на прочность в различных режимах работы, САПР должна обладать

необходимой функцией генератора оптимальной формы объекта на основе заданного набора требований и ограничивающих условий. Такой функцией обладает Autodesk Inventor. Таким образом, с учетом сложности конкретной решаемой задачи, из двух наиболее полнофункциональных систем к дальнейшему использованию принята Autodesk Inventor.

Результаты использования Autodesk Inventor при оптимизации конструкции ПКВН

С использованием инструментов Autodesk Inventor, выполняются работы по усовершенствованию конструкции комплекса ПКВН, в частности, сгенерирована форма опорной рамы и разработан гидравлический распорно-подающий механизм перемещения (РПМП), позволяющий обеспечивать заданное направление движения комплекса.

Отличительной особенностью РПМП является наличие специальной направляющей рамки, которая фиксируется распорными гидроцилиндрами относительно выработки и не позволяет комплексу изменить направление движения даже при возможной неравномерности хода (скорости выдвигания) подающих гидроцилиндров.

Кроме этого, выполненное исследование позволило определить величины напряжений и смещений в опорной раме, запас прочности металлоконструкции.

Целью исследования являлось установление значения имеющегося запаса прочности конструкции под действием силы тяжести. В случае если запас прочности достаточен, можно проводить дальнейшие исследования металлоконструкции под нагрузкой.

Моделирование проводилось для следующих материалов (табл. 3) и исходных данных (табл. 4). Результаты моделирования приведены в таблице 5.

Таблица № 3

Характеристики применяемых материалов

Наименование	Сталь	Сталь высокопрочная	Сталь легированная
Модуль Юнга, ГПа	210,0	200,0	205,0
Коэффициент Пуассона	0,3	0,29	0,3
Плотность, г/см ²	7,85	7,85	7,73
Предел текучести, МПа	207,0	275,0	250,0

Таблица № 4

Исходные данные

Наименование параметра	Значение параметра
Место приложения сил	Все элементы модели
Сила, Н	438192
Толщина металла, h, мм	$h_1=15, h_2=20, h_3=30$

Таблица № 5

Зависимость значений коэффициента запаса прочности металлоконструкции ПКВН от вида материала и толщины металла

Наименование материала	Толщина металла		
	$h_1=15$ мм	$h_2=20$ мм	$h_3=30$ мм
Сталь	20,11	26,5	39,35
Сталь, высокопрочная	26,7	28,77	40,27
Сталь, легированная	21,6	33,3	43,2

На основании полученных результатов можно утверждать, что сгенерированная металлоконструкция опорной рамы и механизма

перемещения ПКВН имеет достаточный запас прочности для проведения ее дальнейших исследований под нагрузкой. Кроме того, из полученных значений видно, что за счет изменения толщины металла и марки материала имеется возможность существенного увеличения запаса прочности – более чем в два раза.

Заключение

Использование методики формализованного анализа функциональной полноты дает возможность еще на стадии предварительного анализа исключить из дальнейшего рассмотрения САПР, не имеющие необходимых пользователю функций, произвести оценку уровня соответствия систем предъявляемым требованиям, сформировать группу систем, обладающих одинаковой функциональной полнотой и проанализировать их по другим критериям.

Данная методика позволила сделать обоснованный выбор САПР для решения конкретной практической задачи по усовершенствованию конструкции проходческого комплекса ПКВН. Результат анализа функциональной полноты показал, что наиболее целесообразно использовать систему Autodesk Inventor. С ее помощью выполнена генерация формы опорной рамы комплекса в совокупности с механизмом перемещения и сделан предварительный анализ запаса прочности металлоконструкции. Величина коэффициента запаса прочности с учетом только силы тяжести конструкции при различном сочетании влияющих факторов составляет от 20,11 до 43,2, что позволяет проводить ее исследование под нагрузкой в критических режимах работы.

Литература

1. Хазанович Г.Ш., Воронова Э.Ю. Конструктивные особенности и основные параметры агрегатированного взрывонавалочного проходческого
-

комплекса // Горное оборудование и электромеханика, 2013, №4, С.9-16.

2. Voronova E Yu and Khazanovich G Sh, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 560, 1: 012048. DOI:10.1088/1757-899X/560/1/012048

3. Khazanovich G.S., Voronova E.Yu., Otrokov A.V. Simulation of the performance formation process of the loader with wedge-like working elements as a part of the blast and bulk tunneling complex / Procedia Engineering 206, 2017. pp. 457-464. DOI: 10.1016/j.proeng. 2017.10.501.

4. Хубаев Г.Н. Сравнение сложных программных систем по критерию функциональной полноты // Программные продукты и системы (SOFTWARE&SYSTEMS), 1998, №2, С.6-9.

5. Щербаков С.М. Метод анализа сложных систем по критерию функциональной полноты: расширение и адаптация // Системное управление. 2010. №2 (8). URL: sisupr.mrsu.ru/wp-content/uploads/2015/02/SCHERBAKOV_1.pdf.

6. Хубаев Г. Н., Щербаков С. М., Аручиди Н. А. ПС анализа сложных систем по критерию функциональной полноты «Ireland» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ RUS №2009615296. М.: РОСПАТЕНТ, 2009.

7. Жевакин Д.М., Широбокова С.Н., Сериков О.Н., Диков М.Е., Перекрестова Т.И. Анализ функциональной полноты устройств контроля здоровья // Инженерный вестник Дона, 2019, № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6231.

8. Широбокова С.Н., Сериков О.Н. Формализованный анализ функциональной полноты систем видеоаналитики // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5465.

9. Хубаев Г.Н. Сегментирование рынка на основе различий в требованиях покупателей к функциональной полноте товара: универсальная

методика (на примере программных продуктов) // Наука и бизнес: пути развития. 2019, № 3 (93), С. 219-224.

10. Щербakov С.М., Клименко А.А. Анализ систем автоматизации учебно-методической деятельности по критерию функциональной полноты // Инженерный вестник Дона, 2020, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6437.

References

1. Khazanovich G.Sh., Voronova E.Yu. Gornoe oborudovanie i elektromehanika. 2013, №4. pp. 9-16.

2. Voronova E Yu and Khazanovich G Sh, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 560, 1: 012048. DOI:10.1088/1757-899X/560/1/012048.

3. Khazanovich G.Sh., Voronova E.Yu., Otrokov A.V. Procedia Engineering 206, 2017. pp. 457-464. DOI: 10.1016/j.proeng. 2017.10.501.

4. Khubaev G.N. Programmnye produkty i sistemy (Software&Systems). 1998, No. 2. pp. 6-9.

5. Shcherbakov S.M. System Management. 2010, №2 (8). URL: sisupr.mrsu.ru/wp-content/uploads/2015/02/SCHERBAKOV_1.pdf.

6. Khubaev G.N., Shcherbakov S.M., Arutchidy N.A. PS analiza slojnih system po kriteriyu funkcionalnoy polnoty. Svidetelstvo ob oficialnoy registraciy programmy dlya EVM RUS №2009615296, 2009.

7. Zhevakin D.M., Shirobokova S.N., Serikov O.N., Dikov M.E., Perekrestova T.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N9y2019/6231.

8. Shirobokova S.N., Serikov O.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5465.

9. Khubaev G.N. Nauka i biznes: puti razvitiya, 2019, № 3(93), pp. 219-224.



10. Shcherbakov S.M., Klimenko A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6437.