

## Анализ ветрового воздействия на здание параметрической архитектуры

УДК 69.04

**Кравченко Галина Михайловна**

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

**Труфанова Елена Васильевна**

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

**Полетаев Максим Вадимович**

Студент, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: mapoleta@yandex.ru

Статья получена: 10.03.2019. Рассмотрена: 14.03.2019. Одобрена: 19.03.2019. Опубликовано онлайн: 26.06.2019. ©РИОР

**Аннотация.** В статье рассмотрено моделирование ветрового воздействия на здание сложной параметрической формы. Разработано несколько вариантов конечно-элементных моделей — балочные и безбалочные плиты перекрытия с консольными свесами, несущие элементы в виде колонн и пилонов. По результатам динамического расчета выбрано оптимальное конструктивное решение каркаса здания. Моделирование ветрового воздействия выполнено по нормативной документации и в ПК *ANSYS*. Анализ результатов счета показал, что напряженно-деформированное состояние элементов каркаса во второй модели отличается от значений, полученных по нормативным рекомендациям. Показано, что существующие нормы проектирования требуют уточнения методики определения ветровой нагрузки для зданий и сооружений сложной геометрической формы.

**Ключевые слова:** ветровое воздействие, параметрическая архитектура, конструктивные решения, метод конечных элементов, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние.

Ветровое воздействие вносит большой вклад в напряженно-деформированное состояние конструкций зданий параметрической архитектуры и требует более детального учета ветровой нагрузки, чем в нормативных документах [1].

С целью снижения ветровых воздействий на поверхности здания необходимо выбрать оптимальную конструктивную модель, отвечающую требованиям по несущей способности и соответствующую параметрической форме объекта [2].

Для исследования ветрового воздействия выбрано проектируемое двадцатиэтажное зда-

### ANALYSIS OF THE IMPACT OF WIND ON BUILDING PARAMETRIC ARCHITECTURE

**Galina Kravchenko**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: galina.907@mail.ru

**Elena Trufanova**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: el.trufanova@mail.ru

**Maksim Poletaev**

Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: mapoleta@yandex.ru

**Manuscript received:** 10.03.2019. **Revised:** 14.03.2019. **Accepted:** 19.03.2019. **Published online:** 26.06.2019. ©РИОР

**Abstract.** The article deals with the modeling of wind impact on the building of complex parametric shape. Several variants of finite element models have been developed—beam and beam-free floor slabs with cantilever overhangs, bearing elements in the form of columns and pylons. According to the results of the dynamic calculation, the optimal structural solution of the building frame was chosen. Simulation of wind impact is performed according to the normative documentation and in the PC “ANSYS”. Analysis of the results of the account showed that the stress-strain state of the frame elements in the second model differs from the values obtained by the regulatory recommendations. It is shown that the existing design standards require clarification of methods for determining the wind load for buildings and structures of complex geometric shape.

**Keywords:** wind impact, parametric architecture, constructive solution, finite element method, finite element model, stress-strain state.

ние параметрической архитектуры административного назначения в г. Ростове-на-Дону.

Численный эксперимент по регулированию напряженно-деформированного состояния плит перекрытий каркаса здания с консольными свесами позволил определить изгибающие моменты, возникающие в зонах пересечения консольного вылета плиты перекрытия и вертикальных несущих элементов, которые необходимо учитывать при конструировании данного узла.

Разработано два варианта конструктивного решения плиты перекрытия — безбалочное (рис. 1, а) и с балками (рис. 1, б).

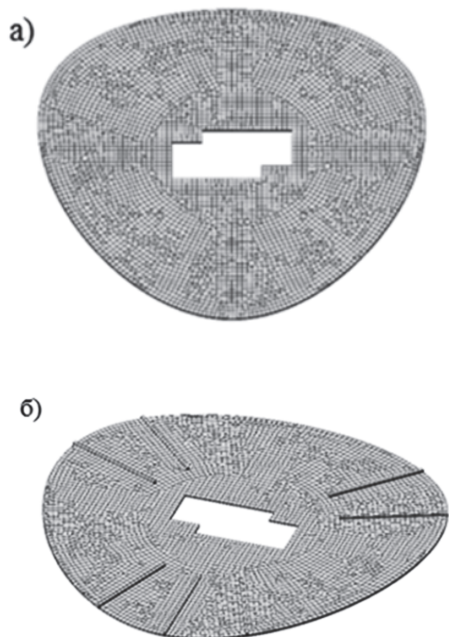


Рис. 1. Конструктивное решение плиты: а) без балок; б) с балками

При моделировании эксцентриситета стержни шиваются при помощи абсолютно жестких вставок с узлами конечно-элементной модели плиты. На рис. 2, а представлена визуализация балки в виде конечно-элементной сетки. 3D-модель фрагмента каркаса здания представлена на рис. 2, б.

В расчетной модели учтены собственный вес, постоянные и полезные нагрузки. По результатам статического расчета получены перемещения плиты перекрытия, изолинии которых показаны на рис. 3.

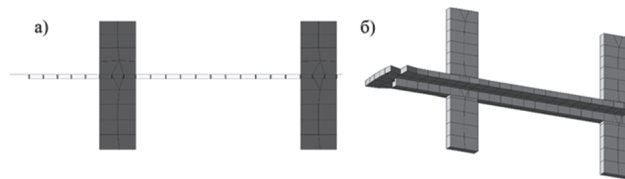


Рис. 2. Визуализация балки: а) КЭ-сетка; б) 3D-модель

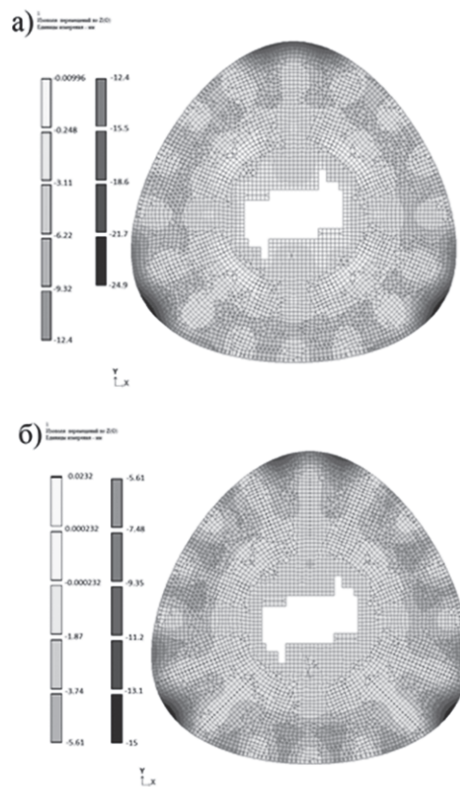


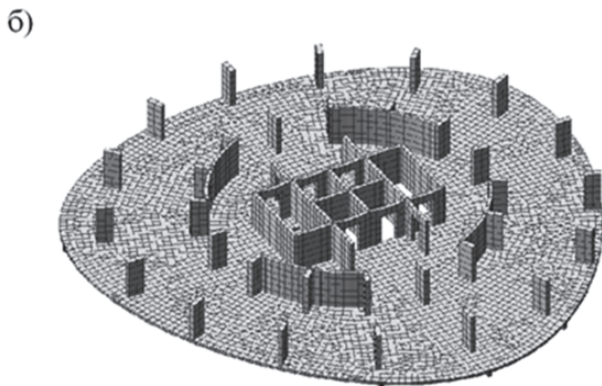
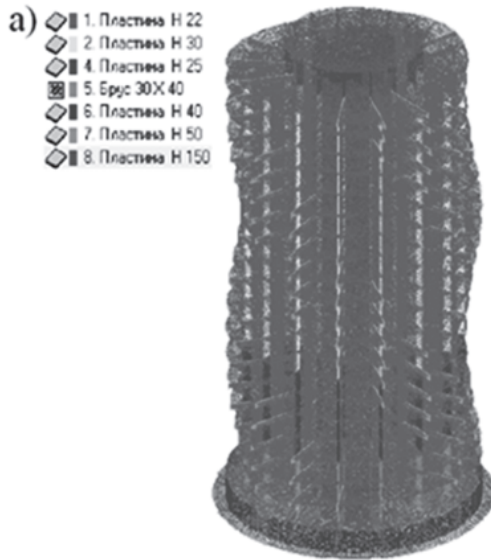
Рис. 3. Вертикальные перемещения плиты перекрытия: а) безбалочной; б) с балками

Максимальные перемещения плиты в первом варианте составляют 24,9 мм, во втором — 15 мм. В качестве ограждающих конструкций предлагается витраж алюминиевый, для которого номеруются значения вертикальных перемещений крайней точки консольного свеса. В связи с этим оптимальной признана вторая конструктивная схема.

Для исследования динамических характеристик разработаны конечно-элементные модели каркаса здания с несущими элементами в виде колон и пилонов в ПК САПФИР и импортированы в ПК ЛИРА САПР [2].

Первая модель: несущие элементы каркаса здания выполнены из бетона класса В25 и включают фундаментную плиту 1500 мм, стены под-

вала 400 мм, диафрагмы жесткости 250 мм, стены ядра жесткости 300 мм, плиты перекрытия 220 мм, лестничные марши и промежуточные площадки 200 мм, монолитные балки  $300 \times 400$  ( $h$ ) мм, пилоны в подвале и на 1–4-м этажах  $1200 \times 500$  мм, на 5–7-м этажах  $1200 \times 400$  мм, выше 7-го этажа  $1200 \times 500$  (рис. 4).

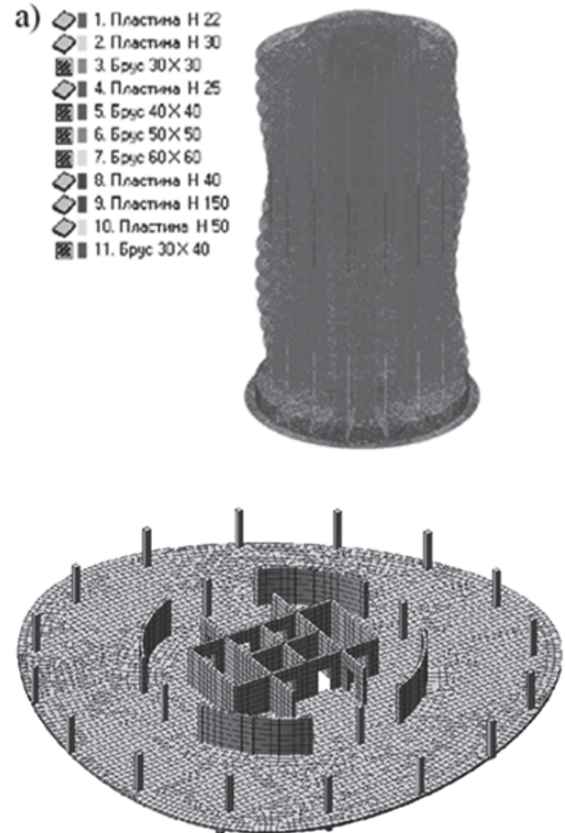


**Рис. 4.** Первая расчетная модель:  
а) распределение материалов; б) фрагмент этажа

Вторая модель отличается наличием несущих элементов в виде колонн в подвале и на 1–5-м этажах сечением  $600 \times 600$  мм, на 6–9-м этажах —  $500 \times 500$ , выше 9 этажа —  $400 \times 400$  (рис. 5).

В расчетных моделях учтены 8 статических нагрузок: собственный вес несущих конструкций; постоянные нагрузки; временная (полезная) нагрузка; временная (длительная) нагрузка; постоянная нагрузка от витража и

грунта; временная (снеговая) нагрузка; статический ветер по  $X$ ; статический ветер по  $Y$ .



**Рис. 5.** Вторая расчетная модель:  
а) распределение материалов; б) фрагмент этажа

Для исследования динамических характеристик каркаса здания выполнен модельный анализ, цель которого сводится к определению частот и форм свободных колебаний конечно-элементной модели в заданном диапазоне [3].

Наибольший интерес представляют значения первых (низших) частот свободных колебаний  $\omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \omega_n^2$ . Соответствующие формы свободных колебаний дают представление о возможных способах деформирования конструкции. На этапе проектирования модальный анализ оценивает эффективность несущего каркаса сооружения, уточняет принятые значения геометрических и физических констант, выполняет проверку на резонанс [4]. Результаты модального анализа представлены в табл. 1.

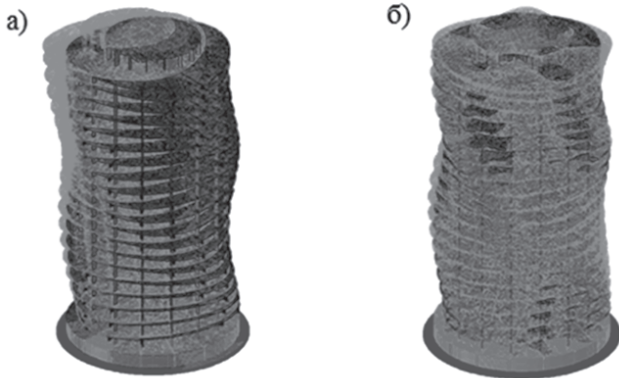
Первая форма колебаний каркаса здания для двух расчетных моделей приведена на рис. 6.



Таблица 1

**Частоты и периоды колебаний (сделать на 10)**

№ формы	Первый вариант расчетной модели			Второй вариант расчетной модели		
	Частота, рад/с	Частота, Гц	Периоды, с	Частота, рад/с	Частота, Гц	Периоды, с
1	3,46	0,55	1,8155	2,78	0,44	2,2558
2	3,53	0,56	1,7814	3,11	0,50	2,0192
3	3,82	0,61	1,6455	3,48	0,55	1,8065
4	11,74	1,87	0,5350	8,41	1,34	0,7464
5	14,29	2,28	0,4395	12,49	1,99	0,5027
6	14,90	2,37	0,4214	13,19	2,10	0,4762
7	23,62	3,76	0,2659	14,75	2,35	0,4256
8	25,29	4,03	0,2483	21,47	3,42	0,2924
9	25,85	4,12	0,2429	24,16	3,85	0,2599
10	25,87	4,12	0,2427	24,53	3,91	0,2560



**Рис. 6.** Первая форма собственных колебаний каркаса здания:

а) первая расчетная модель; б) вторая расчетная модель

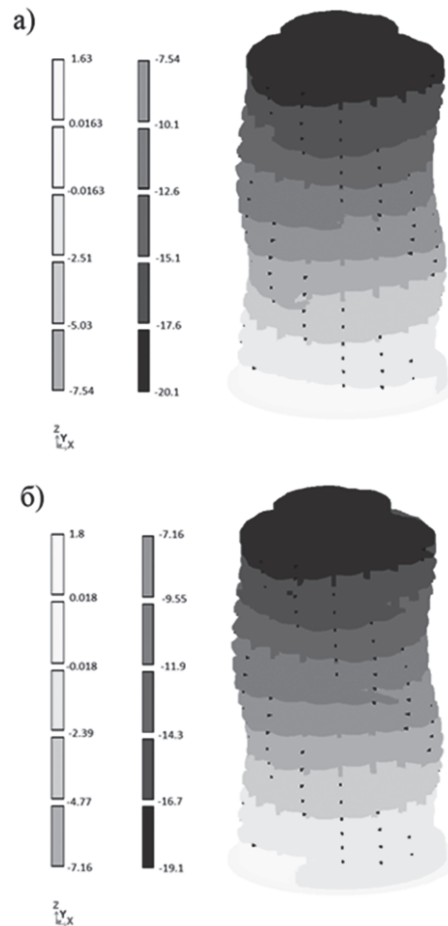
Анализ результатов динамического расчета показал, что первая форма колебаний в первой модели поступательная, во второй — крутильная. Процент вклада модальных масс составил для первой модели 13,4%, для второй — 0%. Характер форм колебаний второй модели показывает недостатки принятых конструктивных решений. Для дальнейших исследований ветрового воздействия принята первая модель с простыми конструктивными решениями по каркасу здания [5].

При расчете пульсационной составляющей ветровой нагрузки необходимо учесть первые три формы колебаний, значения частот которых

меньше предельных  $f_{lim} = 1,44$  Гц согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Расчет пульсационной нагрузки выполнен по двум методам: на основе нормативных значений, указанных в СП «Нагрузки и воздействия» и при учете действительных значений, полученных по результатам расчета в ПК ANSYS [6].

В результате расчета с учетом пульсации ветра, рассчитанной по первому методу, получены перемещения несущих конструкций каркаса здания (рис. 7). Максимальные горизонтальные перемещения составляют вдоль оси X 19,1 мм; вдоль оси Y — 20,1 мм, что меньше нормативных значений.



**Рис. 7.** Перемещения от нормативной ветровой нагрузки: а) вдоль оси Y; б) вдоль оси X

Выполнено моделирование ветрового воздействия в ПК ANSYS для уточнения ветрового давления и зон комфортности здания параметрической формой.

Максимальные горизонтальные перемещения составляют вдоль оси X 30,7 мм, вдоль оси Y —

33,1 мм, что меньше нормативных значений (рис. 8).

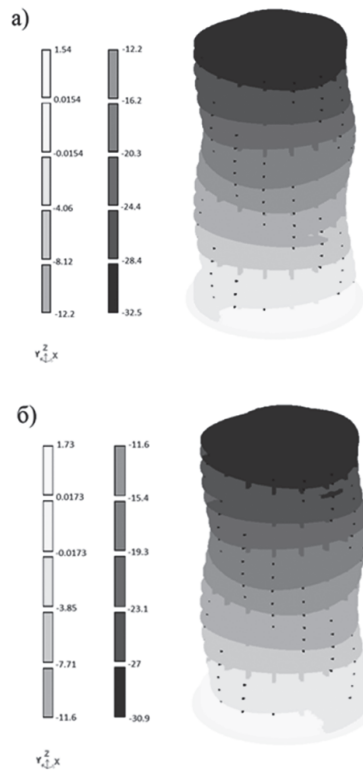


Рис. 8. Перемещения от расчетной ветровой нагрузки:  
а) вдоль оси Y; б) вдоль оси X

Моделирование ветровых потоков в ПК *ANSYS Fluent* позволило уточнить значения нагрузки в расчетной модели каркаса здания параметрической архитектуры. Горизонтальные перемещения увеличились на 40% по сравнению с результатами, полученными в соответствии с нормативной документацией [7].

Анализ моделирования ветрового воздействия методом конечных элементов показал, что существующие нормы проектирования требуют уточнения методики определения ветровой нагрузки для зданий и сооружений сложной геометрической формы.

При расчете ветровой нагрузки в соответствии с СП ограничены поверхности проектируемых зданий. Объекты параметрической архитектуры сложной геометрической формы действующими нормами не рассматриваются.

Разработан следующий алгоритм расчета объекта параметрической архитектуры на ветровое воздействие:

- регулирование напряженно-деформируемого состояния элементов каркаса зданий и сооружений методом варьирования жесткостей;
- анализ динамических характеристик объекта и выбор рационального — варианта конструктивного решения каркаса здания;
- моделирование ветрового воздействия в ПК *ANSYS*;
- расчет пульсационной составляющей ветровой нагрузки и определение зон комфортности;
- определение напряженно-деформируемого состояния элементов каркаса здания параметрической архитектуры с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Предлагаемый авторами подход к расчету ветрового воздействия на объекты параметрической архитектуры позволяет проектировать оптимальные конструкции с достаточной надежностью и долговечностью.

## Литература

1. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 8–17.
2. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела [Текст] / Э.К. Агаханов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2013. — № 2. — С. 39–45.
3. Рабинович И.М. Основы динамического расчета сооружений на действие мгновенных или кратковременных сил [Текст] / И.М. Рабинович. — М.-Л., 1945. — С. 17–19.
4. Зотова Е.В. Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульсные воздействия [Текст] / Е.В. Зотова, Л.Н. Панасюк // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 3. — URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/)
5. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 8–15.
6. Гайджуров П.П. Методы, алгоритмы и программы расчета стержневых систем на устойчивость и колебания [Текст]: учеб. пособие / П.П. Гайджуров. — Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2010. — 230 с.
7. Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования [Текст] / В.В. Зырянов // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2. — URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707/)

## References

1. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchij E.V., Trufanova E.V. Raschet zdaniy slozhnoj geometricheskoj formy na vetrovye vozdejstviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2017, I. 2, pp. 8–17.
2. Agahanov E.K. O razvitii kompleksnyh metodov resheniya zadach mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela [On the development of complex methods for solving problems of mechanics of a deformable solid]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2013, I. 2, pp. 39–45.
3. Rabinovich I.M. *Osnovy dinamicheskogo rascheta sooruzhenij na dejstvie mgnovennyh ili kratkovremennyh sil* [Fundamentals of the dynamic calculation of structures on the action of instantaneous or short-term forces]. Moscow: 1945, pp. 17–19.
4. Zotova E.V., Panasyuk L.N. Chislennoe modelirovanie dinamicheskikh sistem s bol'shim chislom stepeney svobody na impul'snye vozdejstviya [Numerical modeling of dynamic systems with a large number of degrees of freedom on impulse effects]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Inzhenerny Vestnik Don]. 2012, I. 3. Available at: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/)
5. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulirovanie parametrov sobstvennyh kolebanij prostranstvennogo karkasa zdaniya [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, I. 3, pp. 8–15.
6. Gajdzhurov P.P. *Metody, algoritmy i programmy rascheta sterzhnevyyh sistem na ustojchivost' i kolebaniya* [Methods, algorithms and programs for calculating the stability and oscillation of rod systems]. Novocherkassk: YuRGU Publ., 2010. 230 p.
7. Zyryanov V.V. Metody ocenki adekvatnosti rezul'tatov modelirovaniya [Methods for assessing the adequacy of the simulation results]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2013, I. 2. Available at: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707/)