

Сведения о журнале

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал «*Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*» знакомит читателей с достижениями отечественных и зарубежных ученых в области геометрии пространственных конструкций, сопротивления материалов, строительной механики, теории упругости и расчета строительных и машиностроительных конструкций, освещает вопросы научно-технического прогресса в строительстве и машиностроении, публикует аналитические обзоры по теме журнала.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №ФС77-19706 от 13 апреля 2005 г. Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 20479 (полгода) и 80344 (год).

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, сформированный Минобрнауки России, для публикаций основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Перечень вступил в силу 1 декабря 2015 г.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

АНДРЕЕВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (МГСУ, Москва),
БАЖЕНОВ В.А., акад. Национальной Академии педагогических наук Украины, д.т.н., профессор (КНУСА, Киев, Украина),
БОНДАРЕНКО В.М., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
ВАНИН В.В., д.т.н., профессор (Киевский политехнический университет, Украина),
ГОЛИК В.И., д. член РАЕН, д.т.н., профессор (Северо-Кавказский ГТУ, Владикавказ),
ИВАНОВ С.П., д.т.н., профессор (ПГТУ – ВОЛГАТЕХ, Йошкар-Ола),
КАРПЕНКО Н.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (НИИСФ РААСН, Москва),
КОЛЧУНОВ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ЮЗГУ, Курск),
KRASIC SONJA, PhD (University of Nis, Nis, Serbia),
КРИВОШАПКО С.Н., д.т.н., профессор (РУДН, Москва),
ЛЯХОВИЧ Л.С., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ТГАСА, Томск),
ГРУДЕВ И.Д., д.т.н., профессор, почетный член РААСН (ЦНИИПСК, Москва),
ПОТАПОВ В.Д., д.т.н., профессор (МГУПС РФ (МИИТ), Москва),
САНЖАРОВСКИЙ Р.С., д.т.н., проф. (Евразийский Нац. У-т им. Гумилева, Казахстан),
ТРАВУШ В.И., акад. РААСН, д.т.н., профессор (ЭНПИ, Москва),
ЯКУПОВ Н.М., чл- корр. РИА, д.т.н., профессор (ИММ КазНЦ РАН, Казань)

РЕДАКЦИЯ:

д.т.н., профессор С.Н. Кривошапко – *главный редактор*,
д.т.н., профессор В.Н. Иванов – *зам. главного редактора*,
д.т.н. С.Е. Лисичкин; д.т.н., профессор Е.М. Зверьяев; д.т.н., профессор В.И. Обозов;
д.т.н., профессор В.П. Агапов; И.А. Мамиева – *исполнительный редактор*;
Е.А. Гринько – *редактор англоязычного Интернет-сайта журнала*.

Интернет-сайты журнала:

<http://stmj.rudn.ru>,

<http://journals.rudn.ru/structural-mechanics>

Технический секретарь *Е.М. Тупикова*

Компьютерная верстка *Т.И. Карелина*

Почтовый адрес журнала: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, РУДН,
Инженерная академия, Департамент Архитектуры и строительства
Тел.: (495) 955-09-87; (495) 955-07-49; Факс: (495) 955-07-49
E.mail: sn_krivoshapko@mail.ru или i_mamieva@mail.ru
Тираж 250 экз.

Учредитель: Российский университет дружбы народов, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, РУДН

Типография ИПК РУДН, 117923, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

© Журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений», 2017

© И.А. Мамиева, фото на 1-ой странице обложки (Транскам, Северная Осетия)

Строительная механика инженерных конструкций и сооружений

Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings

Обзорно-аналитический и научно-технический журнал

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6 тел.: (495) 955-09-78; FAX: (495)9520829

С о д е р ж а н и е

№ 2, 2017 год

Геометрические исследования срединных поверхностей тонких оболочек

Шамбина С.Л., Вирченко С.Г. Использование компьютерного динамического вариантного формообразования для моделирования инженерных конструкций и сооружений..... 3

Расчет и проектирование строительных конструкций

Бондарев А.Б. Компьютерная программа расчёта точности шарнирно-стержневых систем..... 8

Мокин Н.А. Проведение нелинейных расчетов воздухоопорных оболочек... 24

Аветисян Л.А. Использование шарниров пластичности при расчете зданий на прогрессирующее обрушение в условиях огневых воздействий..... 34

Сейсмостойкость сооружений

Джинчвелашвили Г.А., Булушев С.В. Оценка точности нелинейного статического метода анализа сейсмостойкости сооружений..... 41

Расчет подземных сооружений

Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. Несущие породные конструкции при освоении подземных объектов..... 48

Механика жидкости

Свинцов А.П., Скрипник Т.В., Гусамов М.Т., Кривошапкина Т.К. Надежность индивидуального теплового пункта учебного корпуса Российского Университета Дружбы Народов..... 58

Кампос Седеньо Антонио Фермин, Синиченко Е.К., Грищук И.И. Обоснование изменения расположения створов плотин при комплексном использовании водных ресурсов гидрографической демаркации Манаби.... 65

Расчеты на устойчивость

Иноземцев В.К., Иноземцева О.В., Жесткова С.А. Деформации крена высотного объекта на деформируемой плите..... 74

Критика и рецензии

Джинчвелашвили Г.А. Референция нового учебного пособия по динамике сооружений профессора Анохина Н.Н..... 79

Семенов В.Н. Референция монографии по конструированию поверхностей пространственных конструкций, визуализации поверхностей в системах MathCad и AutoCad профессора Иванова В.Н. и Романовой В.А..... 80

*Contents,
No 2, 2017*

Geometrical investigations of middle surfaces of thin shells

Shambina S.L., Virchenko S.G. The use of computer dynamic shaping for modeling of engineering structures and buildings..... 3

Analysis and design of building structures

Bondarev A.B. Computer program calculation accuracy hinge-bar systems..... 8

Mokin N.A. Nonlinear simulation of air-supported structures..... 24

Avetisyan Levon. Using plastic hinges in the calculation of the buildings on the progressive collapse under fire exposure..... 34

Seismic stability of buildings

Dzhinchvelashvili G.A., Bulushev S.V. Accuracy evaluation of the nonlinear static analysis method of the structures seismic resistance..... 41

Analysis of underground structures

Golik V.I., Razorenov J.I., Lyashenko V.I. Bearing rock structures during the development of underground facilities..... 48

Mechanics of liquid

Svintsov A.P., Scripnic T.V., Gusamov M.T., Krivoshapkina T.K. The reliability and availability of heating of the building of campus of RUDN University..... 58

Campos Cedeno Antonio Fermin, Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Justification of change of the arrangement of alignments of dams at complex use of water resources of hydrographic demarcation of the Manaba..... 65

Buckling analysis

Inozemtzev V.K., Inozemtzeva O.V., Zhestkova. S.A. List's deformations of high-rise building on deformable slab..... 74

Criticism and reviews

Dzhinchvelashvili G.A. Review of new manual of Prof. N.N. Anokhin on dynamics of structures..... 79

Semyonov V.N. Review of a monography of Prof. V.N. Ivanov and V.A. Romanova on design of surfaces of structures and visualization of the surfaces in MathCad and AutoCad..... 80

Геометрические исследования срединных поверхностей тонких оболочек

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО
ВАРИАНТНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

С.Л. ШАМБИНА, канд. техн. наук, доцент *

С.Г. ВИРЧЕНКО, аспирант **

* Российский университет дружбы народов

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; E-mail: shambina_sl@mail.ru

** Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

03056, Киев, пр. Победы, 37; E-mail: servirchenko@gmail.com

В данной статье проанализированы некоторые аспекты использования компьютерного вариантного динамического формообразования для автоматизированного проектирования инженерных конструкций и сооружений. Предлагаемая методика является дальнейшим развитием структурно-параметрического подхода к геометрическому моделированию технических объектов, разработанного научной школой прикладной геометрии НТУУ «КПИ им. И. Сикорского».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированное проектирование, динамическое вариантное формообразование, инженерные конструкции и сооружения, геометрическое моделирование.

На нынешнем этапе развития общества одним из перспективных направлений совершенствования различных технических объектов, в том числе инженерных конструкций и сооружений, является широкое применение при их проектировании компьютерных информационных технологий [1]. Данная методология обеспечивает не только улучшение качества создаваемой промышленной продукции, но и снижение затрат при ее изготовлении и эксплуатации.

Высокая производительность современных компьютеров и разнообразных их периферийных устройств (цветных графических дисплеев и принтеров, сканеров, видеокамер, сетевых карт и т. д.) позволяют при автоматизированном проектировании реализовывать *комплексное компьютерное моделирование*. Под данным термином подразумевается разработка и использование компьютерных моделей, которые отражают исследуемый технический объект одновременно в аспектах нескольких дисциплин, например, прочности, конструкции, технологии изготовления, эксплуатации, экономики, экологии и т. д.

Во многих указанных случаях в качестве интегрирующей и согласовывающей основы для создания промышленной продукции выступают ее геометрические модели. О важности формообразования срединных поверхностей оболочек строительных тонкостенных пространственных конструкций свидетельствуют, например, публикации [2-7].

Главной задачей разработки многих технических объектов считается определение таких их конфигураций, которые наиболее полно удовлетворяют поставленным целям и имеющимся ограничениям. Поскольку для сложных изделий выполнение этого задания, как правило, не может быть формализовано в полной мере, то на практике сейчас обычно прибегают к вариантному автоматизированному проектированию.

Прогрессивной тенденцией современного компьютерного геометрического моделирования является методология структурно-параметрического формообразования, основные положения которой даны в статье [8]. Дальнейшим ее развитием можно считать *динамическое вариантное формообразование* с использованием метода полипараметризации [9-10].

На основе имеющихся в приведенных выше литературных источниках материалов изложим предлагаемую методику комплексного компьютерного моделирования инженерных конструкций и сооружений с применением динамического вариантного формообразования. Проиллюстрируем соответствующие приемы, см. рис. 1, на примере сборных железобетонных куполов [3, 4].

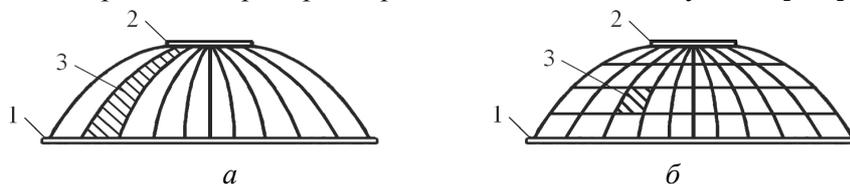


Рис. 1. Сборные железобетонные купола:

а – меридиональная разрезка; *б* – меридионально-кольцевая разрезка

1 – нижнее опорное кольцо, 2 – верхнее кольцо, 3 – трапециевидная панель

В указанных публикациях описан порядок выполнения прочностных расчетов данных сооружений, а также проанализированы некоторые разновидности их конструкции.

В качестве меридиональных образующих куполов с круговым основанием могут использоваться дуги окружностей, эллипсов, парабол, отрезки прямых и т. д. Согласно этому создадим следующий кортеж возможных проектных вариантов формы купола

$$\Phi K = (\Phi K_j)_1^4, \quad (1)$$

где $\Phi K_1 = \text{СК}$ – сферический, $\Phi K_2 = \text{ЭК}$ – эллиптический, $\Phi K_3 = \text{ПК}$ – параболический, $\Phi K_4 = \text{КК}$ – конический.

В соответствии с рис. 1 исследуемые структурные варианты разрезки купола на сборные элементы описываются множеством

$$PK = (PK_j)_1^2, \quad (2)$$

где $PK_1 = \text{МР}$ – меридиональная разрезка, $PK_2 = \text{МКР}$ – меридионально-кольцевая разрезка.

В изданиях [3-5] указывается, что на выбор формы и конструктивных решений купола оказывают влияние не только архитектурные соображения, но и такие технико-экономические требования как соответствие характеру действующих нагрузок, минимальный расход строительных материалов, простота изготовления, транспортирования и монтажа элементов купола и т. д.

В работе [5] отмечается, что достижение необходимых показателей качества в процессе возведения зданий, а также при изготовлении на заводах элементов их конструкции, в значительной степени зависит от того, в какой мере принятые проектные решения учитывают реальные производственные условия.

Технологичность сборной строительной конструкции заключается в ее приспособленности к имеющимся технологиям и выражается в затратах человеческого труда, машинного времени, материальных и финансовых ресурсов на изготовление, транспортировку и монтаж элементов этой конструкции.

Состав приведенных процессов для моделируемого купола определим кортежами

$$IK = (IK_j)_1^{N_{IK}}, \quad TK = (TK_j)_1^{N_{TK}}, \quad MK = (MK_j)_1^{N_{MK}}, \quad (3)$$

где N_{IK} , N_{TK} , N_{MK} – соответственно количество проектных вариантов изготовления, транспортирования и монтажа купола.

Согласно структурно-параметрическому подходу на основании соотношений (1) ... (3) строится комплексная проектная вариантная модель купола в виде показанного на рис. 2 мультиграфа.

В данном случае купол К представляется в виде кортежа

$$K = (K_i)_1^5, \quad (4)$$

где $K_1=ФК, K_2=РК, K_3=ИК, K_4=ТК, K_5=МК$.

При этом каждый элемент множества (4) описывается некоторым вектором параметров

$$P_{ij} = (p_{ijk})_1^{Np_{ij}}, \quad (5)$$

где Np_{ij} – число параметров j -го варианта i -го элемента.

Структурные взаимосвязи между разновидностями n -й и m -й составляющей модели купола К определяются матрицей смежности

$$C_{nm} = \|c_{nr}c_{ms}\|; \quad n, m, r, s \in N; \quad (6)$$

$$n \neq m; \quad r \in (1 \dots N_n); \quad s \in (1 \dots N_m),$$

где N_n и N_m – число вариантов n -й и m -й составляющей, $c_{nr}c_{ms} \neq 0$ при взаимодействии вариантов K_{nr} и K_{ms} , $c_{nr}c_{ms} = 0$ – в противном случае.

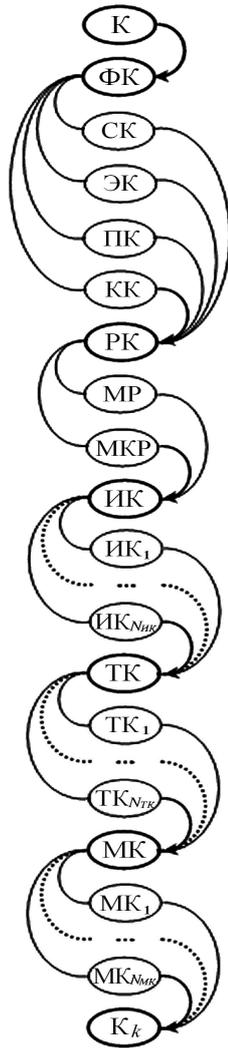
В результате использования зависимостей (1) ... (6) моделируемый купол К представляется как множество его проектных вариантов

$$K = (K_k)_1^{N_K}. \quad (7)$$

Поиск элементов кортежа (7), наиболее полно удовлетворяющих проектным условиям, осуществляется как результат проводимой на графе структурно-параметрической оптимизации. При этом дугам графа присваиваются необходимые числовые значения, рассчитанные по определенным зависимостям.

Так, например, монтажная технологичность существенно зависит от разрезки сооружения на монтажные элементы (их габаритов и массы), количества и характера циклов подъема конструкций кранами и т. д. Эффективность строительных работ повышается при сокращении монтажного цикла, который включает в себя время на строповку сборного элемента, подъем на монтажный горизонт, установку и выверку, временное крепление, расстроповку и перемещение грузового крюка с монтажного горизонта до площадки складирования конструкций, постоянное закрепление.

Рис. 2. Комплексная вариантная модель купола К



Как видим, для получения точной расчетной модели монтажа необходима *динамическая геометрическая модель* возведения сооружения, которая на основании габаритных и массовых свойств элементов конструкции, а также их монтажных траекторий позволяет довольно точно определять необходимые проектные параметры и характеристики производственного процесса.

На рис. 3 показаны фрагменты компьютерного динамического вариантного формообразования срединной поверхности купола с применением меридионально-кольцевой разрезки.

Необходимая для этого программа, например в системе Maple, имеет вид:

with(plots);

p1:=0:p2:=0:p3:=0: # x,y, z координаты центра эллипсоидальной поверхности

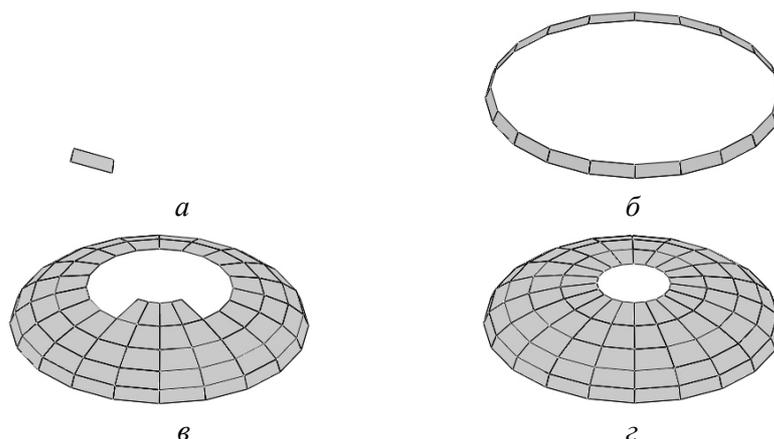


Рис. 3. Динамическое геометрическое моделирование купола:
 а – первая панель; б – первое кольцо; в – построение завершающего кольца;
 г – окончательный вид модели

```

p4:=20; p5:=20; p6:=7: # x,y,z полуоси эллипсоидальной поверхности
cv:=.25: # угол (в радианах) расположения верхнего кольца
Ndu:=5: # количество участков (панелей) вдоль параметра u
Ndv:=20: # количество участков (панелей) вдоль параметра v
Nd:= Ndu*Ndv: # число фреймов
# вспомогательные переменные
R:=max(abs(p1+p4), abs(p2+p5), abs(p3+p6))+1:
opt:=axes=None,view=[-R..R, -R..R,-R..R]:
# анимация
animate(plot3d,[[p1+p4*cos((Pi/2-cv)*u)*cos(2*Pi*v),p2+p5*cos((Pi/2-
cv)*u)*sin(2*Pi*v),p3+p6*sin((Pi/2-cv)*u)],u=floor((i-1)/Ndv)/Ndu..(floor((i-
1)/Ndv)+1)/Ndu,v=(i-1-floor((i-1)/Ndv)*Ndv)/Ndv..(i-floor((i-1)/Ndv)*Ndv)/Ndv,
style=patch,grid=[2,2],color=gray,opt],i=1..Nd,frames=Nd,trace=Nd-1);
    
```

Использование управляющих параметров рассмотренной модели (форма, размеры и положение купола, количество панелей в кольцевом и меридиональном направлении) поясняют комментарии приведенной программы.

Таким образом, в данной публикации проанализированы некоторые типовые приемы предлагаемой методики для комплексного компьютерного моделирования инженерных конструкций и сооружений при их автоматизированном проектировании на основании структурно-параметрического подхода с применением динамического вариантного формообразования.

Несколько иной подход для формообразования инженерных конструкций и сооружений используется в монографии [11].

Л и т е р а т у р а

1. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
2. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Аналитические поверхности в архитектуре зданий, конструкций и изделий. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. – 328 с.
3. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции. – М.: Архитектура-С, 2006. – 120 с.
4. Маилян Р.Л., Маилян Д.Р., Веселев Ю.А. Строительные конструкции. – Ростов н/Д.: Феникс, 2005. – 880 с.
5. Афанасьев А.А., Арутюнов С.Г., Афонин И.А. и др. Технология возведения полнотелых зданий. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 360 с.
6. Krivoshapko S.N., Shambina S.L. Design of developable surfaces and the application

of twin-walled developable structures // *Serbian Architectural Journal*. – Vol. 4, 2012, No. 3. – Belgrad. – P. 298-317.

7. Christian A. Bock Hyeng, Emmanuel B. Yamb. Application of Cyclic Shells in Architecture, Machine Design, and Bionics // *International Journal of Modern Engineering Research*. – Vol.2, Issue.3, May-June 2012. – P. 799-806.

8. Ванін В.В., Вірченко Г.А. Визначення та основні положення структурно-параметричного геометричного моделювання // *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. – Вип. 23. – Харків: ХДУХТ, 2009. – С. 42-48.

9. Ванін В.В., Вірченко С.Г., Вірченко Г.І. Варіантне моделювання геометричних об'єктів методом поліпараметризації // *Проблеми інформаційних технологій*. – №02(016) грудень 2014. – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 76-79.

10. Ванін В.В., Шамбина С.Л., Вірченко Г.І. Вариантное компьютерное макетирование оболочек на основе полипараметризации их срединных поверхностей // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2015. – №6. – С. 3-8.

11. Иванов В.Н., Романова В.А. Конструктивные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad. – М.: Издательский дом АСВ, 2016. – 412 с.

References

1. Li K. (2004) *Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE)*, SPb.: Piter, 560 p.
2. Krivoshapko S.N., Mamiyeva I.A. (2012) *Analiticheskie Poverkhnosti v Arkhitekture Zdanii, Konstrukcii i Izdelii*. Moscow: Kn. Dom "LIBROKOM", 328 p.
3. Lebedeva N.V. (2006) *Fermy, Arki, Tonkostennyye Prostranstvennyye Konstrukcii*. M.: Arhitektura - C, 120 p.
4. Mailian R.L., Mailian D.R., Veselev I.U.A. (2005) *Stroitel'nye Konstrukcii*, Rostov n/D.: Feniks, 880 p.
5. Afanasev A.A., Arutiunov S.G., Afonin I.A. i dr. (2002) *Tekhnologiya Vozvedeniia Polnosbornykh Zdanii*. M.: Izd-vo ASV, 360 p.
6. Krivoshapko, S.N., Shambina, S.L. (2012) Design of developable surfaces and the application of twin-walled developable structures, *Serbian Architectural Journal*, Vol. 4, No. 3, Belgrad, p. 298-317.
7. Christian A. Bock Hyeng, Emmanuel B. Yamb. (2012) Application of Cyclic Shells in Architecture, Machine Design, and Bionics, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol.2, Iss. 3, p. 799-806.
8. Vanin, V.V., Virchenko, G.A. (2009) Vyznachennia ta osnovni polozhennia strukturo-parametrychnogo geometrychnogo modeliuвання, *Geometrychne ta Komp'uterne Modeliuвання*, Vyp. 23, Kharkiv: KHDUKHT, p. 42-48.
9. Vanin, V.V., Virchenko, S.G., Virchenko, G.I. (2014) Variantne modeliuвання geometrychnykh ob'ektiv metodom poliparametrizatsii, *Problemy Informatciynykh Tekhnologii*, №02 (016), Kherson: KHNTU, p. 76-79.
10. Vanin, V.V., Shambina, S.L., Virchenko, G.I. (2015) Variant computer shell prototyping based on polyparameterization of middle surfaces// *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015, №6, p. 3-8.
11. Ivanov V.N. Romanova V.A. Design of the Forms of Space Structures (Visualization of the Surfaces at MathCad and AutoCad: Monograph, Moscow: Izd-vo ASV, 2016, 412 p.

THE USE OF COMPUTER DYNAMIC SHAPING FOR MODELING OF ENGINEERING STRUCTURES AND BUILDINGS

S.L. SHAMBINA*, S.G. VIRCHENKO**

*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Kiev

This article analyzes some aspects of the use of variant dynamic shaping for computer-aided design of various engineering constructions and buildings. The proposed method is a further development of structural-parametric approach for geometric modeling of technical objects which was developed by scientific school of applied geometry National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute».

Key words: computer-aided design, dynamic variant shaping, engineering constructions and buildings, geometric modeling.

Расчет и проектирование строительных конструкций

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЁТА ТОЧНОСТИ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

А.Б. БОНДАРЕВ, инженер по металлоконструкциям строительной дирекции
АО «Рудник имени Матросова»
685000, Магадан, ул. Пролетарская, д. 12
E-mail: bondarev_a_b_rus@mail.ru, BondarevAB@polyus.com

В статье выполнен обзор и анализ ранее выполненных исследований, а также компьютерных программ для расчёта точности, в том числе для строительных металлоконструкций. Приведено описание и анализ функциональных возможностей нового Вычислительного Комплекса «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК). Проведена верификация ВК РАСК, подтверждающая правильность и точность выполнения расчёта точности. Выполнено описание технологии работы пользователя с различными меню и в целом с ВК РАСК. Приведён пример расчёта точности на примере однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки. Общая форма шарнирно-стержневых объектов из металлоконструкций для с помощью ВК РАСК может быть выполнен расчёт точности может быть разнообразна: цилиндрическая, сферическая, эллиптическая, тороидальная, коническая и другая.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчёт точности, компьютерная программа, большепролетные металлические пространственные покрытия, размерная цепь, сборочные отклонения

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие компьютерные программы позволяют выполнить комплексную расчётную оценку и определение напряжённо-деформированного состояния (НДС) пространственных стержневых металлоконструкций. Хотя не всегда используются величины отклонений, возникающие в конструкции при их сборке. Иногда для определения НДС конструкций с отклонениями используют метод Мора или метод статистических испытаний, стандартные методы теории размерных цепей. Такие подходы не отражают накопления отклонений при сборке конструкций.

Кроме того, величины отклонений конструкций могут быть получены путём расчёта точности. Решение задач расчёта точности актуально на раннем этапе конструирования изделия, когда технологические особенности подготовки производства конкретного изделия мало проработаны. Пригодится расчёт точности и на заключительном этапе процесса проектирования в качестве инструмента для заключительной поверки и в целях разработки оптимальной технологии производства.

В работах [4, 6] выполнено обоснование необходимости разработки компьютерной программы – Вычислительный Комплекс «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК), т.к. в сравнении с другими известными способами и программами при помощи ВК РАСК возможен учёт отклонений длин стержней, формы отверстий и многосвязность (наличие нескольких замыкающих звеньев) стержневых систем. В основу алгоритма ВК РАСК заложены уравнения точности, а также известные в геометрии и геодезии уравнения [22, 23, 24]. В геодезии, например, такие процедуры используются в так называемом методе «круговых засечек», а также при выполнении многих других геодезических процедур.

В данной статье приведено описание и анализ функциональных возможностей ВК РАСК. Выполнена верификация ВК РАСК, подтверждающая правильность и точность выполнения расчёта точности. Выполнено описание технологии работы пользователя с различными меню и в целом с ВК РАСК.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

Изготовление изделий высокого качества в сжатые сроки и оптимизация прибыли требуют точных и эффективных аналитических инструментальных средств, которые тесно интегрированы с САД системами твердотельного моделирования. Точность является важным показателем детали (узла, агрегата), определяющим её способность вы-

полнять свои рабочие функции. От точности зависят надёжность не только самой детали, но и экономичность, производительность, уровень вибраций и шума всей конструкции, что в совокупности характеризует качество продукции [28].

В настоящее время задачи проектирования деталей и узлов должны решаться на основе широкого применения вычислительной техники. Автоматизация проектирования и создание в САД программах специальных модулей для расчёта размерных цепей позволяет сократить сроки подготовки производства и выпуска новой продукции, а также уменьшить издержки, и повысить качество проектных работ [3].

В настоящее время существуют мощные САД пакеты машиностроительного направления. Они предлагают модули, позволяющие выполнить размерный анализ сборки узлов и агрегатов конструкций. Среди наиболее известных САД пакетов можно отметить Solid Works [2]; Autodesk Inventor; Pro/ENGINEER; CETOL 6 Sigma; SIGMUND Works; Kompas-3D. По факту в принципе все известные мощные САД-пакеты аналогичны друг другу. Принципиальных различий в них нет тем более в части модуля размерного анализа. Поэтому, рассмотрим функциональные возможности модулей размерного анализа на примере программы Solid Works.

Во всех программах твердотельного моделирования требуется создание 3D-модели, что позволяет по назначенным допускам определить размер замыкающего звена. В результате каждого исследования для замыкающего размера становятся известны: номинальное значение; минимальный и максимальный допуски (наихудший случай); минимальный и максимальный RSS-допуск; контрибуция – относительная степень участия элемента в размерной цепи и его влияние на замыкающее звено (в %). Размеры цепи и граничные условия по монтажу определяются между гранями и кромками САД-модели, что позволяет измерять зазор (натяг) между поверхностями по фактическому минимальному расстоянию [28].

Создание 3D-модели в программе очень трудоёмкий процесс, но даже не эта сложность, вернее одна из причин, которая заставила отказаться от применения программ твердотельного моделирования при выполнении расчёта точности шарнирно-стержневой системы, и к необходимости разработки ВК ПАК. Вторая причина – отсутствие возможности расчёта пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями в существующих САД-пакетах. Фактически в модули размерного анализа САД-пакетов заложена методика расчёта пространственной размерной цепи по [7]. Третья причина – невозможность создавать сборку из дефектных стержней, т.е. с отклонениями длин элементов, не говоря уже как о форме отверстий, так и собственно формы стержней. При создании такой конструкции возникает программный конфликт, который не позволяет выполнить сборку дефектной системы.

Существует также значительное количество авторских программных реализаций доступных в сети INTERNET, которые позволяют выполнить размерный анализ стержневых и иных систем. Среди них можно отметить Otkloneniy Razmerov, Dimcalc, Con-7 и РЦ-1. Однако – программы позволяют выполнить расчёт только линейных размерных цепей и без учёта вероятностного распределения отклонений – согласно методик [7].

В работе А.В. Анкина и Д.Л. Кузьминского [3] отмечается, что на сегодняшний день ни одна программа не позволяет произвести расчет пространственной размерной цепи. В то же время без применения ЭВМ произвести такие расчёты становится затруднительным либо невозможным. Такой вывод делают авторы и других работ [1, 2, 8, 9]. Кроме того, А.В. Анкин совместно с Д.Л. Кузьминским для решения обозначенной проблемы разработали программный комплекс РПРЦ (расчёт пространственной размерной цепи). Данный комплекс построен по модульному принципу: модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования – от чертежа, расчета и моделирования проектируемого оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. В модули программы РПРЦ включены такие общеизвестные пакеты прикладных программ как NASTRAN, MatLab, Solid Works. Однако со слов авторов программы она всё же направлена на решение вопроса собираемости узлов и агрегатов машиностроительной отрасли. Для расчёта точности многоэлементных систем их разработка не подходит [3].

Программа для расчёта линейной модели пространственной размерной цепи, предложенная С.В. Исаевым, Л.А. Кашубой [8] также не позволяет выполнить расчёта проч-

ности многоэлементной шарнирно-стержневой системы. В своей программе С.В. Исаев для расчёта цепи добавлял новую систему координат, а раз так, то результат расчёта – реальные координаты для узла не привязаны к проекту жёстко, и не учитывает много-связности шарнирно-стержневых систем. Следовательно, для расчёта точности много-элементных систем с одной системой координат программа С.В. Исаева не подходит.

Под руководством Е.В. Лебеда, в настоящее, проводятся исследования отклонений и начальных усилий, которые возникают в двухпоясных металлических куполах из-за погрешностей изготовления, и монтажа их конструкций [10 - 16].

В строительстве для выполнения измерений и их анализа используются геодезические приборы и инструменты. В настоящее время известно множество программных комплексов, осуществляющих обработку полевых измерений путём решения геодезических задач. Среди широкого спектра рассмотренных программ необходимо отметить наиболее известные: MicroSurvey® STAR*NET [22], AutoCAD Civil 3D [30]. Менее известные – Objectland [24], Geozem [23], CREDO_3DAT.

Все эти программы позволяют автоматически решать различные геодезические задачи: полярная засечка по измеренному углу; полярная засечка по дирекционному углу; линейная засечка и многие другие. Существенным недостатком таких программ является, то, что они требуют выполнения измерения геометрии реального объекта, т.е. уже возведённого. Расчёт точности с помощью программ, предназначенных для производства и обработки геодезических измерений невозможен.

На основе известных в геодезии геометрических процедур В.А. Савельев совместно с Е.В. Лебедем разработали методику определения геометрических отклонений пространственных металлических конструкций в вероятностной постановке как численной имитации на компьютере процесса его сборки и монтажа с использованием метода Монте-Карло, а также реализовали в разработанных Е.В. Лебедем программах GENES, SBORKA и MONTAG [17-20, 25-27]. Используемые в программах GENES, SBORKA и MONTAG процедуры геометрического расчёта широко известны в геодезии и реализованы, например, в таких программных комплексах как Micro Survey, Autodesk Civil 3D, GEOZEM, Objectland.

Впервые при определении отклонений геометрический подход разработан в геодезии при геодезических построениях – разбивке земельных участков. В ЦНИИПСК им. М.П. Мельникова В.А. Савельевым с Е.В. Лебедем использованы аналогичные процедуры. В.А. Савельев и Е.В. Лебедь использовали известные геометрические процедуры, реализованные в программе MONTAG при корректировке проекта главного корпуса ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина в Российской Федерации, Московская область, г. Истра по варианту «Цилиндр» [17].

Зарубежные исследователи предлагают создавать пространственные конструкции с возможностью управления их поведением как одним из способов борьбы с дефектами – работы Gaul L., Albrecht H., Grierson D.E. [33], Hasan R., Xu L., Winitzer J. [34] и другие. В результате анализа зарубежных источников следует обратить внимание, что в этих работах предлагается полуактивное (semi-active) управление поведением конструкций, в том числе, с отклонениями. Работы Charles R. Farrar [32], Kaouk, Zimmerman [35], Kohtaro Matsumoto, Sachiko Wakabayashi, Masahiro Noumi, Tetsuji Yoshida, Hiroshi Ueno, Yutaro Fukase [37], Kaveh A., Nouri M. [38], Ömer KELEŞOĞLU, Mehmet ÜLKER [41], Tokunbo Ogunfunmi [43], Tsou P., Shen M.-H. [44], Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia [45] отражают вопросы вибродиагностики дефектов конструкций антенн, радиотелескопов и развёртываемых структур. Для надёжной и бесперебойной эксплуатации зарубежные исследователи предлагают устанавливать регуляторы формы для радиотелескопов, которые позволят управлять их формой при эксплуатации. Такие конструкции в зарубежной литературе ещё называются адаптивными (adaptive construction), т.е. приспособляющиеся под условия эксплуатации. Кроме тех исследователей, что указаны выше вопросами точности формы пространственных управляемых конструкций космических антенн, радиотелескопов и пространственных по-крытий занимаются Kartal M.E. [36], M. Ohsaki [39], Makowski Z.S. [40], Pearson J.E. [42].

Следовательно, на основании изложенного выше возникает необходимость совершенствования, а фактически создания новой компьютерной программы для расчёта точности пространственных шарнирно-стержневых систем, которая

одновременно со связностью системы и отклонениями длин стержней позволит учесть и форму отверстий при расчёте точности по методике [6, 31]. Поэтому разработана компьютерная программа ВК РАСК, предназначенная для расчёта точности стержневых конструкций с осеболтовыми и многоболтовыми соединениями, учитывающая отклонения длин стержней, форму отверстий и многосвязность – учёт наличия нескольких замыкающих звеньев в размерной цепи. ВК РАСК создан с помощью системы программирования Delphi 7 под управлением Windows.

Характерной особенностью ВК РАСК является то, что он позволяет определить размеры замыкающего звена цепи на основе статистического моделирования величин отклонений, как отдельных элементов – стержней, так и всего объекта расчёта (здания, сооружения) в соответствии с их технологической схемой возведения. В основу ВК РАСК заложен статистический метод расчёта точности – нахождение номинального значения и величины линейного допуска замыкающего звена размерной цепи при известных номинальных значениях и допусках составных звеньев. Также, возможно использование других методов и способов расчёта точности, т.к. они присутствуют в функционале ВК РАСК. Кроме того, у ВК РАСК существует режим «нет отклонений», «предельные погрешности», «заданные погрешности».

Предельные погрешности – анализ по методу максимум-минимум. Заданные погрешности – анализ погрешностей сборки на основе выполнения реальных замеров длин стержней, которые могут быть выполнены на заводе-изготовителе металлоконструкций. Результаты формирования действительной геометрии как пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями могут быть использованы в решении задач анализа и синтеза размерной цепи. При построении расчётной схемы между элементами, участвующими в расчёте размерной цепи, автоматически назначаются необходимые геометрические процедуры, которые зависят от технологической взаимосвязи между элементами при определённой пользователем последовательности сборки системы в конструктивную форму.

Величины отклонений, полученные при помощи ВК РАСК могут быть использованы при определении сборочных (начальных, монтажных) усилий при определении НДС стержневых конструкций.

СТРУКТУРА, ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ, ИМПОРТ ДАННЫХ ИЗ ВК РАСК В ДРУГИЕ СИСТЕМЫ

Компьютерная программа ВК РАСК построена по модульному принципу. Модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования – от чертежа, расчёта и моделирования проектируемого сооружения, оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. Расчёт точности в ВК РАСК состоит из следующих этапов:

- создание номинальной геометрической формы стержневой системы с использованием Autodesk AutoCAD;
- определение массивов координат узлов номинальной формы стержневой системы с использованием Autodesk Civil-3D либо Micro Survey, либо при помощи иного программного комплекса;
- задание массивов координат, полученных из Autodesk Civil-3D либо Micro Survey, либо из иного программного комплекса в ВК РАСК путём ручного ввода или импорта файла с координатами в формате *.txt – рис. 1;
- задание массивов стержней в зависимости от технологической последовательности сборки (возведения) конструкций или сооружения в целом путём ручного ввода или импорта файла с координатами в формате *.txt – рис. 1;
- назначение параметров расчёта для отдельных стержней либо конструкции в целом – рис. 1, 2;
- назначение составных и замыкающих стержней в системе, что зависит от технологической последовательности возведения здания, либо выполнение данной функции с помощью средств ВК РАСК автоматически «Найти порядок построения конструкции» – рис. 2;

В программе **ВК РАСК** предусмотрена возможность импорта файлов исходных данных, подготовленных в текстовом формате, что позволяет передать исходные данные на рисунке 1 исходных данных в виде, доступном для контроля. Файл исходных

данных в текстовом формате должен иметь расширение *.txt и его можно создавать в текстовом редакторе или передавать из других программ, которые формируют исходные данные в виде текста, то есть с расширением *.txt. В программе ВК РАСК для выполнения статистического анализа погрешностей при сборке предусмотрено несколько возможных законов распределения: нормальный; равномерный; Симпсона и экспоненциальный. Последовательность задания данных в ВК РАСК при продольной последовательности сборки дана на примере однопоясной шарнирно-стержневой системы – рис. 4.

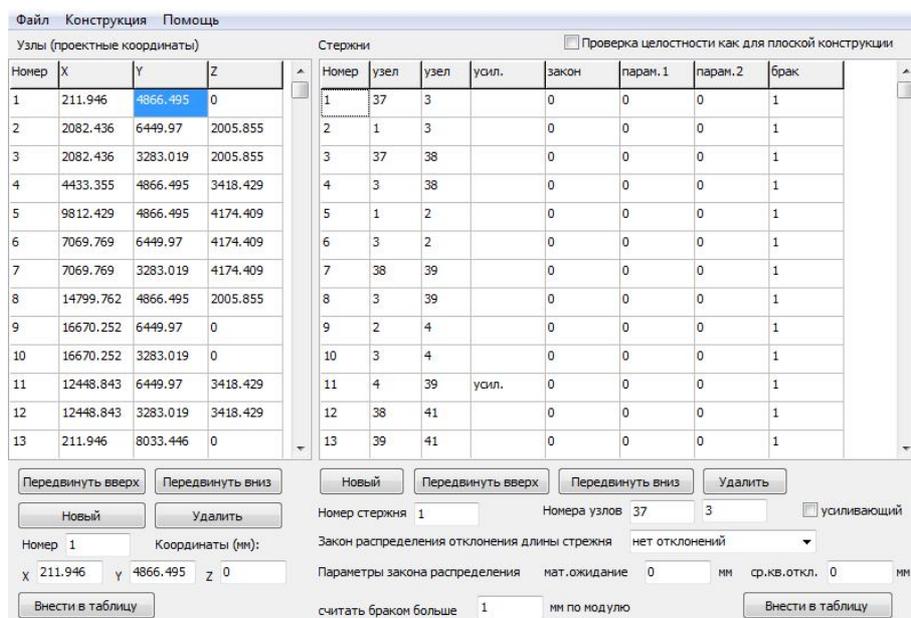


Рис. 1. Узлы (проектные координаты) и стержни, кнопки управления номерами стержней

Импорт данных как для узлов так и для стержней выполняется из раздела меню **Файл** операцией **Импорт узлов в формате YXZ** – импортирование координат узлов в формате YXZ и **Импорт стержней в формате N₁ N₂** – импортирование обозначения стержней в формате N₁ N₂. После активации нужных операций выполняется импорт, и импортруемая информация автоматически заполняет формы таблиц как на рис. 1.

В комплексе предусмотрен и обратный процесс – экспорт данных, т.е. преобразование из формата проекта в текстовое описание для программы **MS Excel**. Таким образом, в **MS Excel** выгружаются все результаты расчёта в виде текстового формата и могут быть использованы как для дополнительной обработки, так и для использования, например, в **ВК SCAD** для определения НДС – усилий, напряжений, деформаций.

В окне функции **Закон распределения отклонения длины стержня** задаётся один из следующих ниже законов распределения отклонений:

Нет отклонений – функция, когда стержень изготовлен без отклонений;

Нормальный – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые нормальному (Гауссовскому) закону распределения;

Равномерный – когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые равномерному закону распределения;

Симпсона – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые закону распределения по треугольнику (распределение Симпсона);

Экспоненциальный – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, подчинённые экспоненциальному закону распределения; **Предельные погрешности** – функция, когда в стержне присутствуют отклонения, полученные на основании контрольных замеров каждого стержня при приёмочном контроле, т.е. фактические отклонения изготовления.

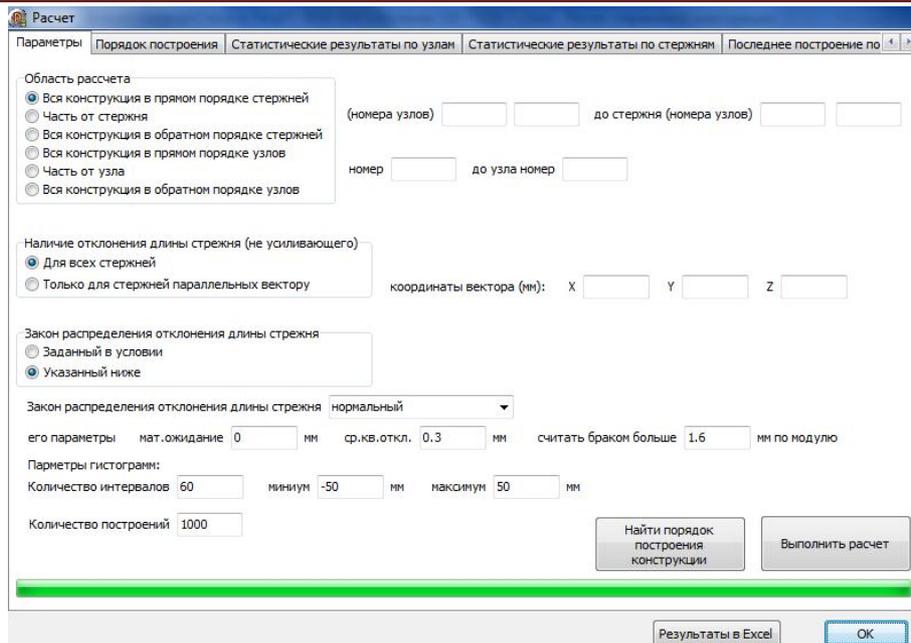


Рис. 2. Пункты Меню «Расчёт» и «Закон распределения отклонения длины стержня»

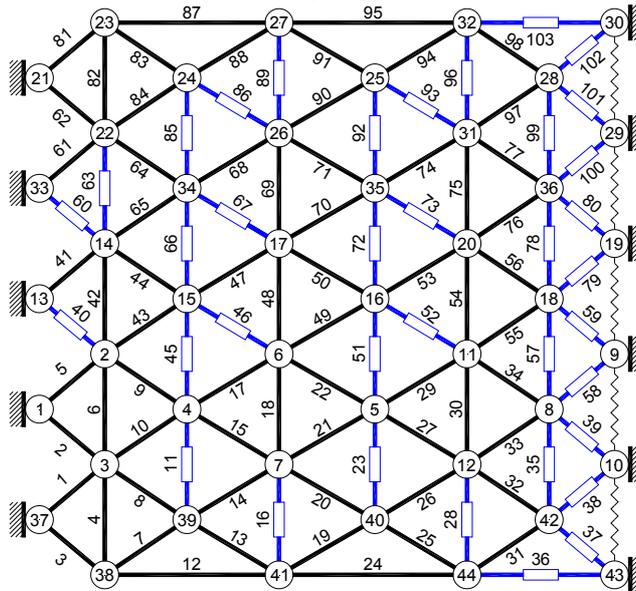


Рис. 3. Однопоясная шарнирно-стержневая оболочка при продольной сборке.

В окне функции **Параметры закона распределения** задаются параметры, характеризующие тот или иной закон распределения. Для каждого из законов эти параметры индивидуальны и могут быть заданы для каждого стержня индивидуально. Функция **Внести в таблицу** аналогична той, что показана на рис. 1 для узлов. В окне функции **Считать браком по модулю** задаётся величина предельного отклонения больше которого отклонение быть не может при любом законе распределения. **Проверка целостности данных** – пункт ниспадающего меню **Конструкция**. Этот пункт является контрольной функцией, которая позволяет до выполнения расчётов выполнить проверку правильности ввода исходных данных на предыдущем этапе. **Порядок построения** – автоматическое определение процедур геометрического построения, исходя из строго заданного порядка соединения стержней в исходных данных. Данное меню дублирует функцию **Проверка целостности данных** основного меню и является одним из пунктов меню **Расчёт**.

МЕНЮ ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА.

Меню **Параметры расчёта** является одним из пунктов ниспадающего меню **Конструкция**, которое вызывается нажатием левой кнопки мыши по меню **Расчёт**.

Меню **Параметры** позволяет задать область расчёта и закон распределения отклонений для заданной области расчёта – всего сооружения или его отдельной части. Под меню **Областью расчёта** понимается сооружение или его часть, для которого выполняется определение погрешностей и их статистическая оценка. Другими словами, выполняется расчёт собираемости.

Меню **Область расчёта** включает следующие самостоятельные пункты:

Вся конструкция в прямом порядке стержней – расчёт собираемости всей конструкции в той последовательности стержней, которая задана в исходных данных;

Часть от стержня – расчёт собираемости части конструкции, начиная от любого заранее заданного номера стержня конструкции в той последовательности, которая задана в исходных данных;

Вся конструкция в обратном порядке стержней – расчёт собираемости всей конструкции в последовательности, противоположной той, что задана в исходных данных для стержней;

Вся конструкция в прямом порядке узлов – расчёт собираемости всей конструкции в той последовательности узлов, которая задана в исходных данных;

Часть от узла – расчёт собираемости части конструкции, начиная от любого заранее заданного узла стержня конструкции в той последовательности, которая задана в исходных данных;

Вся конструкция в обратном порядке узлов – расчёт собираемости всей конструкции в последовательности, противоположной той, что задана в исходных данных для узлов – рис. 2.

Следующий пункт меню **Параметры** – меню **Наличие отклонения длины стержня**, которое предназначено для одновременного задания отклонений:

- во всех стержнях конструкции;
- для стержней параллельных вектору.

Пункт меню **Закон распределения отклонения для длины стержня** в меню **Параметры** позволяет продублировать закон распределения отклонений, заданный в исходных данных с помощью пункта меню **Заданный в условии** или задать отличный от того, что был в исходных данных с помощью пункта меню **Указанный ниже**. Если используется пункт меню, **Заданный ниже**, то необходимо снова задать любой из законов распределения отклонений для рассматриваемой области конструкции в форму на рис. 2.

МЕНЮ: НАЙТИ ПОРЯДОК ПОСТРОЕНИЯ

Пункт меню **Найти порядок построения** находится в меню **Расчёт** и предназначена для автоматического определения процедур геометрического расчёта формы сооружения или конструкции. Фрагмент меню **Порядок построения** показан на рис. 4. Также в меню **Порядок построения** есть несколько контрольных параметров, которые позволяют определить: недостроенные узлы; недостроенные стержни; стержни, помеченные программой как замыкающие – рис. 4.

После того, как программа автоматически определила порядок построения и все ошибки, если такие были вообще исправлены, можно перейти к пункту меню **Параметры** в меню **Расчёт** для задания параметров закона распределения в меню **Закон распределения отклонения длины стержня**, показанное на рис. 1. После задания закона распределения отклонений длины стержня и его параметров в меню **Закон распределения отклонения длины стержня** можно перейти к выполнению расчёта, что осуществляется нажатием кнопки **Выполнить расчёт**. После завершения расчёта все результаты расчётов можно экспортировать в программу **MS Excel** нажатием кнопки **результаты в Excel**, показанной на рис. 5. Пункт меню **Статистические результаты по узлам** и **Статистические результаты по стержням** находится на отдельных вкладках меню **Расчёт**. Для доступа к требуемому пункту меню требуется активизировать соответствующий пункт левой кнопкой мыши в меню **Расчёт**, используя кнопку , которую можно увидеть на рис. 3, 4.

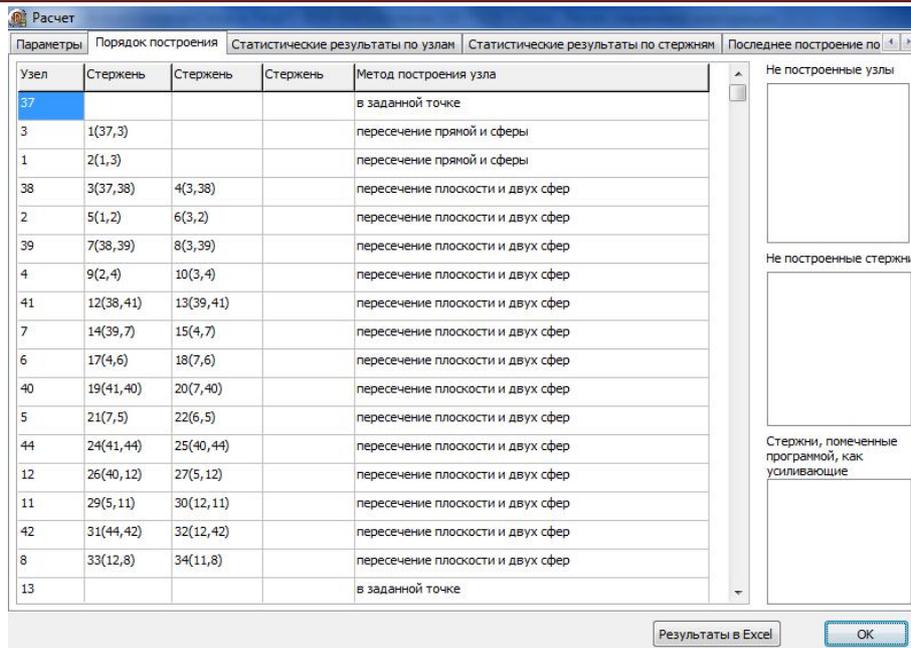


Рис. 4. Меню Порядок построения и контрольные параметры меню Порядок построения
МЕНЮ ПРОСМОТР И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

Меню **Просмотр и анализ результатов расчёта** в ВК РАСК представлено четырьмя пунктами меню **Расчёт**: **Статистические результаты расчёта по узлам**; **Статистические результаты расчёта по стержням**; **Последнее построение по узлам**; **Последнее построение по стержням**.

Для активации указанных выше четырёх пунктов меню необходимо обратиться в меню **Расчёт** и нажатием левой кнопки мыши по кнопке перейти к одному из пунктов меню **Просмотра и анализа результатов расчёта**. Меню **Статистические результаты расчёта по узлам** – статистические результаты расчёта по узлам, полученные на основе многократных статистических испытаний конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 5.

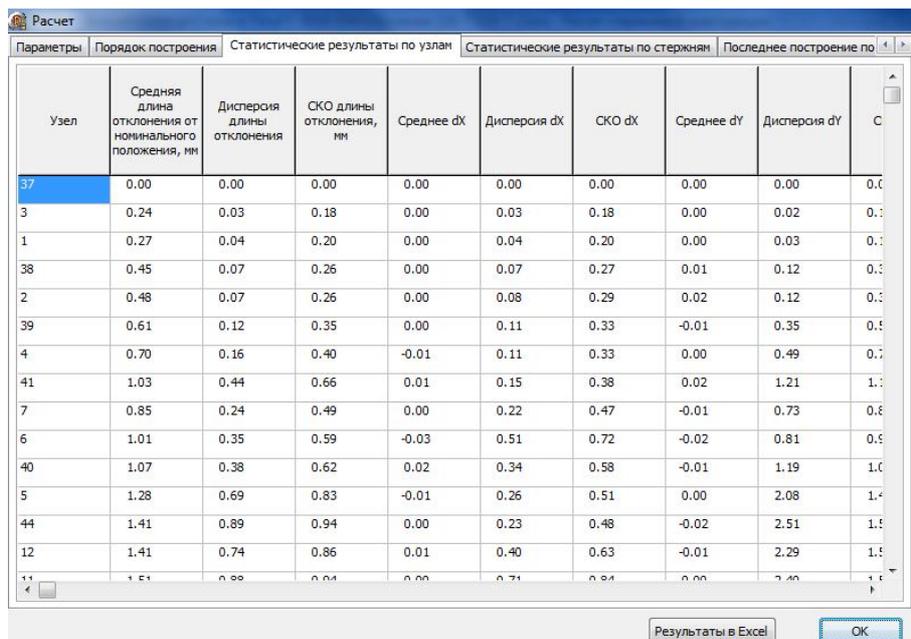


Рис. 5. Статистические результаты по узлам

В этом меню автоматически создаются ведомости статистических результатов отклонений по узлам. Числовые значения отклонений конкретного узла можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**. На экран выводятся отклонения текущего узла в виде рис. 6.

Стержень	Номинальная длина, мм	Среднее отклонение (погрешность изготовления), мм	Средняя фактическая длина, мм	Среднее вычисленное отклонение усиливающих стержней, мм	Дисперсия (одинакова для длины и отклонения)	СКО (одинаково для длины и отклонения)
9(2,4)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.31
10(3,4)	3166.95	-0.01	3166.94		0.09	0.31
11(4,39)	3166.95		3166.97	0.01	0.86	0.93
12(38,41)	5438.39	0.01	5438.40		0.09	0.29
13(39,41)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.30
14(39,7)	3166.95	0.01	3166.96		0.08	0.29
15(4,7)	3166.95	0.02	3166.97		0.08	0.29
16(7,41)	3166.95		3166.92	-0.03	1.44	1.20
17(4,6)	3166.95	-0.02	3166.93		0.09	0.29
18(7,6)	3166.95	-0.01	3166.94		0.09	0.30
19(41,40)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.30
20(7,40)	3166.95	0.01	3166.96		0.08	0.29
21(7,5)	3166.95	0.00	3166.95		0.09	0.30
22(6,5)	3166.95	0.01	3166.96		0.09	0.30
23(40,5)	3166.95		3166.95	0.00	1.60	1.27

Рис. 6. Статистические результаты по стержням

Узел	Номинальные координаты	Фактические координаты	Длина отклонения от номинального положения, мм
1	(211.95; 4866.49; 0.00)	(212.31; 4866.19; 0.39)	0.61
2	(2082.44; 6449.97; 2005.86)	(2082.84; 6450.05; 2006.29)	0.60
3	(2082.44; 3283.02; 2005.86)	(2082.57; 3283.13; 2006.00)	0.22
4	(4433.35; 4866.49; 3418.43)	(4433.38; 4866.08; 3418.45)	0.42
5	(9812.43; 4866.49; 4174.41)	(9813.15; 4864.88; 4174.41)	1.77
6	(7069.77; 6449.97; 4174.41)	(7069.91; 6448.51; 4174.45)	1.47
7	(7069.77; 3283.02; 4174.41)	(7069.54; 3282.33; 4174.34)	0.73
8	(14799.76; 4866.49; 2005.86)	(14800.10; 4865.81; 2005.65)	0.79
9	(16670.25; 6449.97; 0.00)	(16670.25; 6450.14; 0.00)	0.17
10	(16670.25; 3283.02; 0.00)	(16670.25; 3283.51; 0.00)	0.49
11	(12448.84; 6449.97; 3418.43)	(12448.80; 6449.00; 3418.44)	0.97
12	(12448.84; 3283.02; 3418.43)	(12449.79; 3281.69; 3418.16)	1.66
13	(211.95; 8033.45; 0.00)	(211.95; 8033.45; 0.00)	0.00
14	(2082.44; 9616.92; 2005.86)	(2082.37; 9617.54; 2005.79)	0.63
15	(4433.35; 8033.45; 3418.43)	(4433.16; 8034.43; 3418.31)	1.01

Рис. 7. Последнее построение по узлам

Меню **Статистические результаты расчёта по стержням** – статистические результаты расчёта по стержням, полученные на основе многократных статистических испытаний конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 6. В этом меню автоматически создаются ведомости статистических результатов отклонений по стержням. Числовые значения отклонений конкретного стержня можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**. На экран выводятся отклонения текущего стержня в виде – как на рис. 6.

Меню **Последнее построение по узлам** – результаты расчёта по узлам, полученные на основе однократного построения конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 7.

Меню **Последнее построение по стержням** – результаты расчёта по стержням, полученные на основе однократного построения конструкции. Форма, в которой представлены результаты расчёта – рис. 8.

Стержень	Номинальная длина, мм	Отклонение (погрешность изготовления), мм	Фактическая длина, мм	Вычисленное отклонение усредняющих стержней, мм
39(8,10)	3166.95		3166.03	-0.92
40(13,2)	3166.95		3167.43	0.48
41(13,14)	3166.95	0.23	3167.18	
42(2,14)	3166.95	0.54	3167.49	
43(2,15)	3166.95	-0.24	3166.71	
44(14,15)	3166.95	-0.30	3166.65	
45(4,15)	3166.95		3168.35	1.40
46(15,6)	3166.95		3168.49	1.54
47(15,17)	3166.95	0.18	3167.14	
48(6,17)	3166.95	-0.07	3166.89	
49(6,16)	3166.95	-0.29	3166.66	
50(17,16)	3166.95	-0.23	3166.73	
51(5,16)	3166.95		3165.93	-1.02
52(16,11)	3166.95		3165.68	-1.27
53(16,20)	3166.95	0.03	3166.98	

Рис. 8. Последнее построение по стержням

В этом меню автоматически создаются ведомости отклонений по стержням, полученные в результате однократного возведения системы. Числовые значения отклонений конкретного стержня можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**. Анализ результатов расчёта может быть представлен гистограммами распределения отклонений узлов или стержней, которые можно просматривать на соответствующих вкладках программы в меню **Расчёт**.

Краткое описание и представление ещё двух пунктов меню просмотра и анализа результатов расчёта представлено ниже. В этом меню автоматически создаются ведомости отклонений по узлам, полученные в результате однократного возведения системы. Числовые значения отклонений конкретного узла можно вывести в окне данных с помощью клавиш **Up** или **Down**.

Меню **Гистограмма по узлам** – построение гистограммы распределения отклонений, на основе многократных статистических испытаний с возможностью экспорта рисунка в **MS Excel** или **MS Word** – рис. 9. Меню **Гистограмма по стержням** аналогично меню **Гистограмма по узлам** как по внешнему виду, так и по функциональным возможностям – рис. 10.

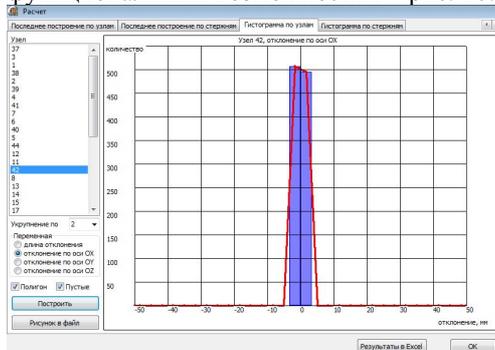


Рис. 9. Меню Гистограмма по узлам

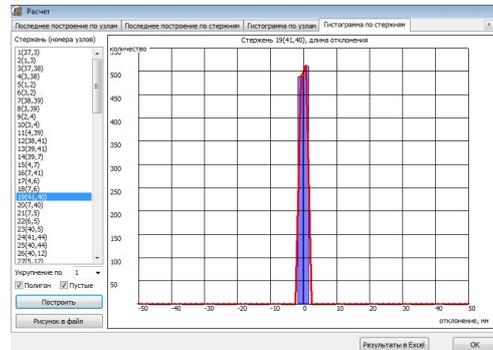


Рис. 10. Меню Гистограмма по стержням

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ

Ниже представлено два примера сопоставительных (контрольных) расчётов плоской размерной цепи, т.е. ячейки плоской шарнирно стержневой системы, показанной на рис. 11. Исследовалось влияние отклонений составляющих звеньев цепи (стержневой фермы) на величину зазора в замыкающем звене цепи (стержневой фермы).

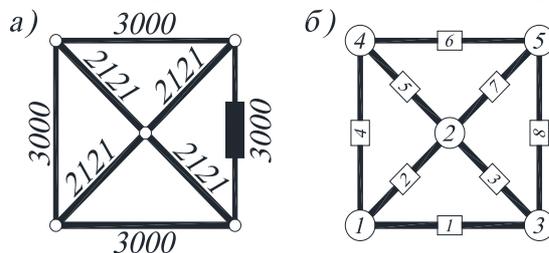


Рис. 11. Схема ячейки фермы: а – геометрическая; б – при расчёте точности

Для определения размера замыкающего звена в плоской шарнирно стержневой конструкции достаточно использовать процедуру пересечения двух окружностей. Потому в исследуемой системе были заданы отклонения составляющих звеньев, что представлено в столбце 3 таблицы 1. Затем система с учётом заданных отклонений составляющих звеньев была вычерчена с помощью программы **AutoCAD**. По результатам вычерчивания получено отклонение в замыкающем звене размерной цепи 7,72 мм – столбец 5 таблицы 1. Чтобы получить размер замыкающего звена – стержня 8, но с помощью **ВК РАСК** зададим в него аналогичные исходные данные.

Таблица 1. Исходные данные плоской размерной цепи

Номер стержня	Номинальная длина стержня, мм	Величина погрешности изготовления, мм	Фактическая длина, мм	Вычисление отклонений по длине (зазор)
1	2	3	4	5
1 (1-3)	3000	0	3000	0
2 (1-2)	2121	+2	2123	+2
3 (3-2)	2121	+3	2124	+3
4 (1-4)	3000	+3	3003	+3
5 (2-4)	2121	+2	2123	+2
6 (4-5)	3000	+2	3002	+2
7 (2-5)	2121	+2	2123	+2
8 (5-3)	3000	?	3006	? (7,72 мм)

Чтобы **ВК РАСК** определил размер замыкающего звена только при параметрах, которые заданы в исходных данных необходимо в окне функции **Закон распределения отклонения длины стержня**, задать только **Заданные отклонения**. Завершение задания величины отклонения в каждом стержне выполняется нажатием кнопки **Внести в таблицу** в окне основного меню. Более подробное описание используемых процедур и функций **ВК РАСК** описано выше. В результате расчёта **ВК РАСК** полученное отклонение составляет 7,72 мм, что полностью соответствует величине зазора, который определён путём вычерчивания в программе **AutoCAD**.

Аналогичный расчёт был произведён с помощью **MS Excel** и его результаты аналогичны тем, что получены в **ВК РАСК** и **AutoCAD**. Вторым способом верификации выполним для того же объекта т.е. плоской размерной цепи, показанной на рис. 11.

Он заключается в том, что для заданного объекта необходимо в меню **Расчёт** задать в окне функции **Закон распределения отклонения длины стержня** только **Нет отклонений**. В этом случае величины всех погрешностей должны равняться нулю, а размеры фактических длин, показанных в столбце 4 таблицы 1, всех звеньев цепи должны равняться их номинальным величинам – столбец 2 таблицы 1. В результате сравнения решения такой верифицирующей задачи с помощью **ВК РАСК**, **AutoCAD** и **MS Excel** расхождений не было. Другими словами, зафиксировано 100 % совпадение между результатами, получаемыми с помощью программ **AutoCAD**, **MS Excel** и **ВК РАСК** – фактические и номинальные размеры стержня одинаковы.

ПРИМЕР РАСЧЁТА ТОЧНОСТИ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Объект исследования – однополая металлическая оболочка покрытия цилиндрической формы дана на рисунке 13.

Цель исследования – расчёт точности шарнирно-стержневой однополой металлической оболочки.

Исследуемая однополая цилиндрическая металлическая оболочка радиусом $R = 10$ м образована из последовательно соединённых в поперечном направлении $N = 7$ монтажных элементов, угол раскрытия образующей $\varphi = 110^\circ$.

Рассмотрим расчёт точности на примере однополой шарнирно-стержневой оболочки, показанной на рис. 12.

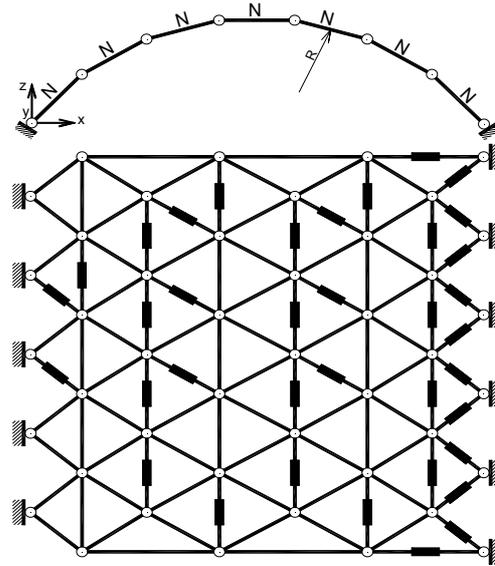


Рис. 12. Схема однополой шарнирно-стержневой оболочки

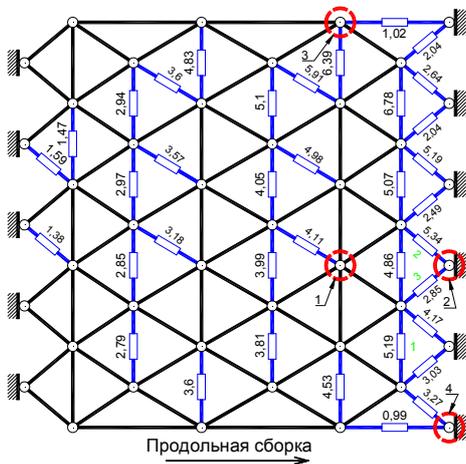


Рис. 13. Схема распределения отклонений однополой шарнирно-стержневой металлической оболочки при продольной сборке (случайные – однократное построение)

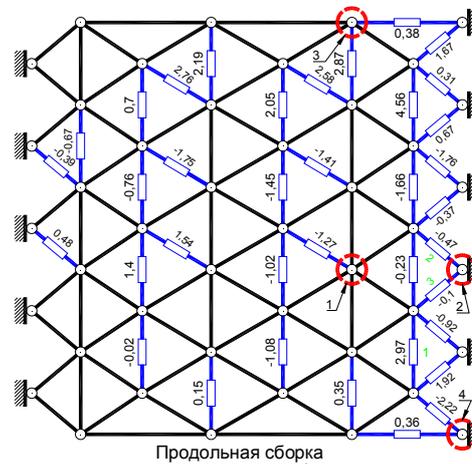


Рис. 14. Схема распределения отклонений однополой шарнирно-стержневой металлической оболочки при продольной сборке (предельные)

Расчёт точности выполнен на примере сборки однослойной цилиндрической оболочки радиусом 10 м со стрелой подъёма 10 м и углом раскрытия оболочки 110° . Рассматриваемая оболочка показана на рис. 13...14 с указанием замыкающих стержней при продольной сборке. Оболочка состоит из семи элементов в поперечном направлении. Обозначение оболочки 110-7, где 110 – угол раскрытия оболочки φ , а 7 –

количество элементов N в поперечном направлении до оси симметрии оболочки. Длина отдельного стержня оболочки составляет 3166 мм.

Сеть оболочки в плане образована равносторонними треугольниками, т.к. это один из часто используемых при проектировании вариантов формообразования несущих оболочек большепролётных покрытий. Сборка однослойной стержневой цилиндрической оболочки выполняется поэлементно в продольном направлении. На рис. 13, 14 представлены схемы распределения отклонений однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки при продольной сборке – случайные (однократное построение) и предельные соответственно. В узлах 1...3 на рис. 13...14 зафиксированы максимальные отклонения относительно осей OX , OY , OZ . Следует заметить, что геометрическая форма стержневой оболочки определяется пространственным положением её узлов. Поэтому определение и оценка погрешностей оболочки вследствие неточностей отдельных элементов выполнена по пространственному отклонению для узлов и линейному для замыкающих стержней от номинальной поверхности.

Замыкающие стержни – стержни, вызывающие при сборке системы появление сборочных усилий. В дальнейшем результаты расчёта собираемости служат исходными данными для получения сборочных усилий в оболочке. Кроме того, они необходимы для определения параметров компенсаторов замыкающих стержней. Значения линейных отклонений замыкающих стержней, полученные из расчёта собираемости, являются дополнительной нагрузкой. Сеть оболочки образована в виде равносторонних треугольников из монтажных элементов длиной 3166 мм. Допускаемое отклонение продольных размеров элементов на монтаж равно ± 5 мм, и $\pm 1,6$ мм – на изготовление элементов по первому классу точности. При продольной и поперечной сборке оболочки 110-7 образуется по 24 замыкающих стержня.

Результаты, полученные из расчёта точности при помощи **ВК РАСК**, могут быть использованы для определения НДС как вновь проектируемого здания или сооружения, так и эксплуатируемого.

ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать такие выводы:

1. Обоснована необходимость разработки компьютерной программы для расчёта точности шарнирно-стержневых металлических конструкций с учётом длин стержней, формы отверстий и многосвязности на основе разработанной методики [6].

2. Разработан алгоритм, и программа расчёта точности шарнирно-стержневых большепролётных пространственных металлических покрытий, позволяющая учесть длины стержней, форму отверстий и многосвязность системы. ВК РАСК имеет преимущества по сравнению с другими известными способами и программами расчёта точности, т.к. позволяет учесть длины стержней, форму отверстий (эллиптичность) и многосвязность конструкций.

3. Изложены общие положения, принципы работы и структура, функциональные возможности компьютерной программы ВК РАСК, а также её верификация.

4. Приведён пример расчёта точности однопоясной шарнирно-стержневой оболочки покрытия. Полученные результаты расчёта точности могут быть использованы при определении монтажных – сборочных усилий, например, при помощи методик, изложенных в работах [1, 5, 21].

Л и т е р а т у р а

1. *Абусамра Авад Юсиф, А.* Влияние начальных несовершенств конструкций двухпоясных сетчатых куполов на их несущую способность [Текст]: диссертация кандидата технических наук / Аттальман Абусамра Авад Юсиф. – Ростов-на-Дону. – 2006. – 148 с.

2. *Алямовский А.А.* Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике. [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев – СПб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 800 с.

3. *Анкин А.В.* Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи [Текст] / А.В. Анкин, Д.Л. Кузьминский // Известия МГТУ «МАМИ». Раздел 2. Технология машиностроения и материалы. – 2011. – Том. 12. – № 2. – С. 106-110.

4. *Бондарев А.Б.* Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» («ВК РАСК») [Текст] / А.Б. Бондарев, А.М. Югов // Свидетельство про регистрацию авторских прав на компьютерную программу № 47952. – Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2013. – 2 с.

5. *Бондарев А.Б.* Методика определения монтажного напряжённо-деформированного состояния большепролётных шарнирно-стержневых металлических покрытий [Текст] / А.Б. Бондарев // Металлические конструкции. – 2016. – Том. 22. – №2. – С. 67-82.
6. *Бондарев А.Б.* Методика расчёта точности большепролётных шарнирно-стержневых металлических покрытий [Текст] / А.Б. Бондарев, А.М. Югов // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – Том. 61. – №1. – С. 60-73.
7. *ГОСТ 21780-2006.* Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности. [Текст] – Взамен ГОСТ 21780-76; введён 31-01-1984. – М.: Издательство стандартов. – 13 с.
8. *Исаев С.В.* Методика оценки линейной модели пространственной размерной цепи для обеспечения взаимозаменяемости объектов производства при сборке. [Текст]: диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук / Сергей Викторович Исаев. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007. – 204 с.
9. *Каушуба Л.А.* Геометрия сборки недеформируемых деталей. // Системный анализ в науке и образовании: электронный научный журнал. Дубна. 2011. №4. [Электронный ресурс]. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.sanse.ru/archive/19>
10. *Лебедь Е.В.* Анализ искажений геометрической формы при сборке составных металлических конструкций [Текст] / Е.В. Лебедь, О.В. Шебалина // Промышленное строительство. – 1992. – № 5. – С. 23-24.
11. *Лебедь Е.В.* Анализ начальных усилий секториально-сетчатого купола при полносборной установке в сравнении со звездчатым куполом [Текст] / Е.В. Лебедь, В.А. Етеревский // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2012. – № 4. – С. 91-98.
12. *Лебедь Е.В.* Геометрический расчёт каркасов пространственных сооружений: Учебное пособие. – Саратов: СГТУ. – 2001. – 40 с.
13. *Лебедь Е.В.* Компьютерное моделирование точности возведения двухпоясных металлических куполов [Текст] / Е.В. Лебедь // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №12. – С. 89-92.
14. *Лебедь Е.В.* Начальные усилия в стержнях односетчатого купола из-за несовершенства его формы при полносборной установке [Текст] / Е.В. Лебедь, В.А. Етеревский // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ. – 2011. – Том. 2. – № 2. – С. 137-144.
15. *Лебедь Е.В.* Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола [Текст] / Е.В. Лебедь // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2003. – Выпуск 3(9). С. 81-86.
16. *Лебедь Е.В.* Оценка точности вычисления среднеквадратического отклонения случайной величины [Текст] / Е.В. Лебедь; ЦНИИПСК им. Н. П. Мельникова. – М., 1991. – 5 с. – Библиогр.: с. 5. – Деп. в ВИНТИ 23.12.91, № 437 – В91.
17. *Лебедь Е.В.* Прогнозирование погрешностей возведения большепролётных металлических куполов на основе геометрического моделирования их монтажа [Текст]: диссертация на соискание научной степени кандидат технических наук / Евгений Васильевич Лебедь. – М.: ЦНИИПСК им. Мельникова. – 1988. – 171 с.
18. *Лебедь Е.В.* Прогнозирование погрешностей возведения каркаса большепролётного 8-ярусного ребристого купола [Текст] / Е.В. Лебедь // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Технические науки. – Волгоград: ВолгГАСУ. – 2003. – Выпуск 2-3(8). – С. 11-17.
19. *Лебедь Е.В.* Точность возведения стержневых пространственных металлических покрытий и её прогнозирование [Текст] / Е.В. Лебедь // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – РУДН. – 2013. – № 4. – С. 5-12.
20. *Лебедь Е.В.* Численное исследование погрешностей возведения большепролётных металлических куполов на ЭВМ // Совершенствование конструктивных решений и методов расчёта строительных конструкций: межвуз. науч. сб. / Саратовский гос. техн. ун-т (Саратов); отв. ред. К. Ф. Шагивалеев. Саратов: СГТУ. – 1999. – С. 45-52.
21. *Моисеев М.В.* Начальные усилия и собираемость стальных структурных конструкций при случайных отклонениях длин стержней [Текст]: диссертация на соискание научной степени кандидат технических наук / Михаил Викторович Моисеев. – Казань: КГАСА. – 2004. – 164 с.
22. Начало работы в MicroSurvey CAD 2010: руководство пользователя [Текст] / MicroSurvey Software Inc. – Westbank, BC: Standard и PLUS. – 2011. – 248 с.
23. Руководство и другие материалы по программе GEOZEM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geozem.com>.
24. Руководство пользователя Objectland в HTML-формате. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.objectland.ru/support/doc/usermanual.
25. *Савельев В.А.* Теоретические основы проектирования металлических куполов [Текст]: автореферат диссертации доктора техн. наук / Виталий Алексеевич Савельев. – М.: 1995. – 40 с.

26. Савельев В.А. Численное моделирование действительной формы консольной составной конструкции. [Текст] / В.А. Савельев, Е.В. Лебедь: ЦНИИПСК им. Мельникова. – М. – 1988. – 24 с. – Деп. во ВНИИИС 09.07.87, № 8102.
27. Савельев В.А. Математическое моделирование монтажа пространственных конструкций [Текст] / В.А. Савельев, О.В. Шебалина // Промышленное строительство.–1991. – № 1. – С. 18-20.
28. Шаломеев М.А. Размерный анализ в Solid Works. [Текст] / М.А. Шаломеев // САПР и графика. Инструменты АРМ. – 2010. – № 10. – С. 40-42.
29. Югов А.М. Методика определения сборочных усилий в большепролетной пространственной стержневой системе [Текст] / А.М. Югов, А.Б. Бондарев // Металлические конструкции. – 2013. – Том 19. – № 3. – С. 137-142.
30. AutoCAD Civil 3D 2009. Руководство пользователя / Autodesk, Inc. – San Rafael, CA: Autodesk. – 2008. – 2452 с.
31. Bondarev A.B., Yugov A.M. The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. pp. 953-963.
32. Charles R. Farrar, Worden Keith, Todd D. Michael, Park Gyuhae, Nichols Jonathon, Adams E. Douglas, Bement T. Matthew, Farinholt Kevin Impacts of artificial intelligence and optimisation on design, construction and maintenance. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory. 2007. 143 p.
33. Gaul L., Albrecht H., Wirtzinger J. Semi-active friction damping of large space truss structures. *Shock and Vibration*. 2004. Vol. 11. pp. 173-186.
34. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures*. 2002. № 80. pp. 2483-2493.
35. Kaouk Zimmerman Structural damage assessment using a generalized minimum rank perturbation theory. *Proceedings of the 34th AIAA SDM Conference*. La Jolla. California. 1993. pp. 1529-1538.
36. Kartal M.E. Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010. Vol. 10. pp. 22-35.
37. Kohmoto Matsumoto, Wakabayashi Sachiko, Noumi Masahiro, Yoshida Tetsuji, Ueno Hiroshi, Fukase Yutaro Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Automation and Robotics in Construction XVI*. UC3M. 1999. pp. 225-230.
38. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. *International Journal of Space Structures* 2009. Vol. 24. № 1. pp.13-26.
39. Makoto Ohsaki Zhang Jingyao Stability conditions of press stressed pin-jointed structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006. Vol. 41. pp. 1109-1117.
40. Makowski Z.S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures. *Proceedings of the international symposium*. Warsaw: Poland. 2002. pp. 17-41.
41. Ömer KELEŞOĞLU, Mehmet ÜLKER Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 2005. Vol. 80. № 5. pp. 321-329.
42. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977. № 67 pp. 360-369.
43. Tokunbo Ogunfunmi Adaptive Nonlinear System Identification. *The Volterra and Wiener Model Approaches*. USA: Springer Science+Business Media, LLC. 2007. 229 p.
44. Tsou P., Shen M.-H. Structural damage detection and identification using neural network. *Proceedings of the 34th. SDM Conference*. La Jolla, California. April. 1993. pp. 3551-3560.
45. Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia Study on the accuracy of response spectrum method for long-span reticulated shells. *International Journal of Space Structures* 2009. Vol. 24. № 1. pp. 27-35.

References

1. Abusamra, Avad Yusif Attalman Influence of initial imperfections designs of two-mesh domes on their load-carrying capacity: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Rostov-on-Don. 2006. 148 p.
2. Alyamovsky A. A., Sobachkin A. A., Odintsov E. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. Solid Works. Computer modeling in engineering practice. SPb.: BHV-Petersburg. 2005. 800 p.
3. Ankin A. V., Kuzminskiy D. L. Software to calculate the spatial dimension chains. *Proceedings of the MSTU "MAMI". Section 2. Mechanical Engineering and Materials*. M.: MAMI, 2011. №2, Vol. 12. Pp. 106-110.
4. Certificate on registration of copyright in a computer program number 47952 Ukraine. Computer program «Computational Complex "Dimensional analysis of rod structures"» («CC DASC») / A. B. Bondarev, A. M. Yugov (Ukraine). No. 48382; declaration 20.12.2012; published 20.02.2013, Bul. No. 1. 2 p. (in Russian)
5. Bondarev Alexey. The Method of Determination of Mounting Stress-Strain State-Span Hinge-Rod Metal Coatings. *Metal Constructions*, 2016. Volume 22. Number 2. pp. 67-82.
6. Bondarev, A. B.; Yugov, A. M. The method of calculating the accuracy of large-span metal rod

- systems. *Magazine of Civil Engineering*, 2016. No. 1(61). pp. 60-73.
7. GOST 21780-2006. Russian State Standard 21780-2006. System for ensuring the accuracy of the geometric parameters in construction. Calculation accuracy. M.: Publishing standards. 13 p.
 8. Isaev S. V. Methodology to evaluate the linear model of the spatial dimension chain to ensure interchangeability of production facilities for assembly. Ph.D. Dissertation Special: 05.11.15. Moscow, 2007. 204 p.
 9. Kashuba L. A. Deformable geometry of the assembly parts. System analysis in science and education. Electronic scientific journal. Dubna. 2011. №4. [Electronic resource]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/19>
 10. Lebed E.V., Shebalina O.V. Analysis of Distortions of the Geometric Shape in the Assembly of Composite Metal Structures. *Industrial Construction*. 1992. No. 5. pp. 23-24.
 11. Lebed E. V.; Eterevisky V. A. Analysis of initial stresses in a sectorial lattice dome during installation as an assembled structure in comparison with a star lattice dome. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Researches*, 2012, No. 4, pp. 91-98.
 12. Lebed E.V. Geometric calculation of space structures frame. *Textbook*. Saratov: SSTU. 2001. 40 p.
 13. Lebed E.V. Computer Modeling of the Accuracy of Erecting Two-Layer Metal Domes. *Industrial and Civil Engineering*. 2013. No. 12. pp. 89-92.
 14. Lebed E.V. Eterevisky V.A. Initial stresses in the bars of a one-layer lattice dome due to the imperfections of its form during installation as an assembled structure. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2011. Vol. 2. No. 2. pp. 137-144.
 15. Lebed E.V. Particularities of numerical simulation of carcassing of single-grid dome. In: *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2003. Issue 3(9). pp. 81-86.
 16. Lebed E.V. Assessment of accuracy of calculation of root-mean-square deviation of chance variable. Moscow. 1991. 5 p.
 17. Lebed E.V. Prediction errors in the construction of large-span metal dome based on geometric modeling of their installation: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Moscow. 1988. 171 p.
 18. Lebed E.V. Forecasting of errors of carcassing of large-span high-rise ribbed dome. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Technical science*, 2003, Issue 2-3(8), pp. 11-17.
 19. Lebed E.V. Accuracy in construction of metal space framed roofs and its predicting. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Researches*. 2013. No. 4. pp. 5-12.
 20. Lebed E.V. Numerical investigation of imprecision of construction of long span steel domes in ECM. *Advanced of structural concepts and methods of analysis of engineering structures: inter-university scientific collection*. Edited by Shagivaleev K.F. Saratov: SSTU. 1999. pp. 45-52.
 21. Moiceev M.V. Starting effort and collection of steel structural constructions in the process of accidental variation of grip length: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Kazan, 2004. 164 p.
 22. Getting Started in MicroSurvey CAD 2010. *User Guide*. MicroSurvey Software Inc. Westbank, BC: Standard and PLUS. - 2011. - 248 p.
 23. Guide and other materials on the program GEOZEM. [Electronic resource]. URL: <http://www.geozem.com>.
 24. User Manual Objectland в HTML. [Electronic resource]. URL: www.objectland.ru/support/doc/usermanual.
 25. Savelyev V.A. Theoretical foundations of metal cupolas: Author's abstract the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Doctor of Engineering. Moscow. 1995. 40 p.
 26. Savelev V.A., Lebed E.V. Numerical simulation of real form of overhanging composite construction. Moscow. 1988. 24 p.
 27. Savelev V.A., Lebed E.V., Shebalina O.V. Mathematical Modeling of Spatial Structures Installation. *Industrial Construction*. 1991. No. 1. pp. 18-20.
 28. Shalomeenko M. A. Dimensional Analysis in Solid Works. // CAD and graphics. Tools APM. 2010. № 10. pp. 40-42.
 29. Yugov, Anatoliy; Bondarev, Alexey Assembly Efforts in Wide-Span Spatial Rod System Determining Technique. *Metal Constructions*. 2013. Volume 19. Number 3. pp. 137-142.
 30. User Manual AutoCAD Civil 3D 2009. US: Autodesk. 2008. 2452 p.
 31. Bondarev A.B., Yugov A.M. The Method of Generating Large-Span Rod Systems with the Manufacturer Defect and Assembly Sequence. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. pp. 953-963.
 32. Charles R. Farrar, Worden Keith, Todd D. Michael, Park Gyuhae, Nichols Jonathon, Adams E. Douglas, Bement T. Matthew, Farinholt Kevin Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory. 2007. 143 p.
 33. Gaul L., Albrecht H., Wirtnitzer J. Semi-active friction damping of large space truss structures.

Shock and Vibration. 2004. Vol. 11. pp. 173-186.

34. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures*. 2002. № 80. pp. 2483-2493.

35. Kaouk Zimmerman Structural damage assessment using a generalized minimum rank perturbation theory. *Proceedings of the 34th AIAA SDM Conference*. La Jolla, California. 1993. pp. 1529-1538.

36. Kartal M.E. Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010. Vol. 10. pp. 22-35.

37. Kohtaro Matsumoto, Wakabayashi Sachiko, Noumi Masahiro, Yoshida Tetsuji, Ueno Hiroshi, Fukase Yutaro Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Automation and Robotics in Construction XVI. UC3M*. 1999. pp. 225-230.

38. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. № 1. pp.13-26.

39. Makoto Ohsaki Zhang Jingyao Stability conditions of press stressed pin-jointed structures. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006. Vol. 41. pp. 1109-1117.

40. Makowski Z.S. Development of jointing systems for modular prefabricated steel space structures. *Proceedings of the international symposium*. Warsaw: Poland. 2002. Pp. 17-41.

41. Ömer KELEŞOĞLU, Mehmet ÜLKER Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2005. Vol. 80. № 5. pp. 321-329.

42. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977. № 67 pp. 360-369.

43. Tokunbo Ogunfunmi Adaptive Nonlinear System Identification. The Volterra and Wiener Model Approaches. USA: Springer Science+Business Media, LLC. 2007. 229 p.

44. Tsou P., Shen M.-H. Structural damage detection and identification using neural network // *Proceedings of the 34th. SDM Conference*. La Jolla, California. April. 1993. pp. 3551-3560.

45. Yue Yin Huang Xin, Han Qinghua, Bai Linjia Study on the accuracy of response spectrum method for long span reticulated shells. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. № 1. pp. 27-35.

COMPUTER PROGRAM CALCULATION ACCURACY HINGE-BAR SYSTEMS

BONDAREV A.B.

Joint Stock Company "Matrosov Mine" (JSC «RiM»), Russian Federation

This article gives an overview and analysis of previous studies, as well as computer programs for calculation of accuracy, including construction steel. The description and analysis of the functionality of the new computer complex "Dimensional Analysis of beam structures" (VC RASK). Verification of EC RASK, confirming the correctness and accuracy of the calculation accuracy. Achieved description of the user experience technology with various menus and the whole VC RASK. An example of the calculation accuracy of the example odnopoyasnoy hinged-rod metal shell. The general form of hinged-rod with metal objects to using the VC RASK can be made exactly the calculation can be varied: a cylindrical, spherical, elliptical, toroidal, conical and other.

Key words: calculation accuracy, a computer program, large-span metal spatial coatings, dimensional chain, assembly deviation.



ПРОВЕДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РАСЧЕТОВ ВОЗДУХООПОРНЫХ ОБОЛОЧЕК

Н.А.МОКИН, аспирант кафедры строительной и теоретической механики
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет» (НИУ МГСУ);
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, mokiavelli@mail.ru

В работе описана методика проведения численных нелинейных расчетов воздухоопорных сооружений с учетом их взаимодействия с окружающей средой. В качестве примера использования методики произведено численное моделирование продувки крупномасштабной модели воздухоопорной сферической оболочки в аэродинамической трубе. Сопоставление экспериментальных и численных результатов доказало применимость описанной методики для решения рассматриваемого класса задач, а также возможность ее расширения на более сложные и перспективные задачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов, метод конечных объемов, вычислительная гидродинамика, аэроупругость, воздухоопорные сооружения, связанные расчеты, взаимодействие конструкций с жидкостью и газом.

Воздухоопорными оболочками (сооружениями) называются мягкие безмоментные оболочки, форма которых поддерживается за счет поддержания избыточного давления воздуха, непрерывно нагнетаемого под оболочку [5, 6]. В связи с малой толщиной материала, его изгибная жесткость пренебрежимо мала и в оболочке возникают только мембранные усилия.

«Пик популярности» пневматических конструкций пришелся на 70-е года XX века, после всемирной выставки «Экспо-70» в г. Осака, Япония. Последующий энергетический кризис [с. 84, 5], в результате которого резко возросли эксплуатационные расходы воздухоопорных сооружений, на время замедлил их распространение. В последние годы в связи с развитием химической промышленности интерес к воздухоопорным оболочкам, и к текстильной архитектуре вообще, вновь возрастает во всем мире [13]. В нашей стране подобные сооружения возводятся ежегодно, поэтому отечественные исследователи вновь обращаются к этой теме [6, 11]. Подобные конструкции, как правило, применяются в качестве покрытий большепролетных сооружений различного назначения.

Конструкции из тканей и тросов обладают намного большей податливостью, чем сооружения из традиционных материалов, поэтому при действии расчетных нагрузок происходит сложное взаимодействие конструкции с окружающей средой, которое приводит как к изменению формы конструкции, так и к изменению самой действующей нагрузки (иногда и по величине, и по направлению). До недавних пор, основным источником знаний о подобных явлениях служили экспериментальные исследования, которые, как правило, проводились для нужд авиационной и космической промышленности. Разработанные аналитические и полуэмпирические методы решения подобных задач преимущественно применимы для узкого класса задач с простейшей геометрией и рядом ограничений, накладываемых на постановку задачи и граничные условия [2].

С развитием вычислительной техники и расчетных программ появилась возможность численно смоделировать взаимодействие сооружения с окружающей средой (англ. *fluid-structural interaction*) с минимальным количеством упрощений. Проведение подобных связанных расчетов в строительной отрасли является достаточно новым и актуальным направлением [2]. Например, расчет воздухоопорных оболочек с тросовым усилением в связанной постановке пока не был встречен в литературе.

Можно выделить два типа расчетов взаимодействия тела со средой (жидкостью или газом):

1) Односторонний расчет (*1-wayFSI*) – производится расчет абсолютно жесткого тела (первоначальной неизменной формы) в потоке жидкости или газа, а затем полученное на поверхности тела поле давлений прикладывается в виде внешней нагрузки, на действие которой тело рассчитывается как деформируемое.

2) Двусторонний связанный расчет (*2-wayFSI*) – представляет собой последовательность односторонних расчетов, выполняемых с малым шагом по времени, так чтобы приращения давлений и перемещений точек тела были достаточно малы. Его суть сводится к тому, что на каждой итерации последовательно выполняются два расчета – динамический расчет конструкции и аэродинамический. Результаты динамического расчета передаются в виде перемещений узлов расчетной сетки, после чего производится решение задачи аэродинамики для модели с измененной геометрией. Результаты этого расчета в виде поля давле-

ний прикладываются к конструкции в виде нагрузок и производится новый динамический расчет с учетом этих дополнительных нагрузок, в результате которого уточняются значения перемещений узлов сетки. После этого опять выполняется уточнение поля давлений по результатам аэродинамического расчета и т.д. пока относительные невязки решений не достигнут заранее заданной точности, в нашем случае 0.01.

Для автоматизации таких расчетов применяются специальные программные средства. В программном комплексе *Ansys* имеются инструменты для решения всех поставленных задач: решение задач строительной механики – *Ansys Mechanical*, задач гидрогазодинамики – *Ansys Fluent* и др., а также средство для проведения связанных расчетов – *System Coupling*. Таким образом, полный двусторонний связанный расчет можно произвести в рамках одного программного комплекса, что достаточно просто осуществить с помощью платформы *Ansys-Workbench*, которая и была использована в данной работе.

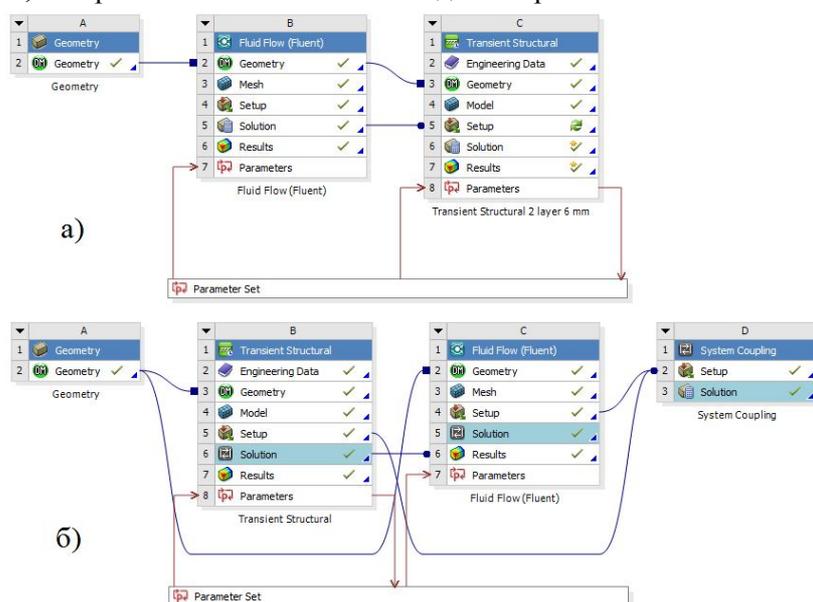


Рис. 1.Схема проекта: а) односторонний расчет; б) двусторонний сопряженный расчет

Для корректного обмена данными, на двух расчетных областях должны быть назначены совпадающие интерфейсные поверхности. Передача данных производится после автоматической интерполяции, следовательно, узлы расчетных сеток на интерфейсных поверхностях не обязаны совпадать, что позволяет использовать различную дискретизацию интерфейсных поверхностей.

Для проведения одностороннего расчета не требуется использование надстройки *SystemCoupling*, импорт нагрузки выполняется внутри модуля *AnsysMechanical*.

Поведение воздухоопорных оболочек в потоке воздуха интересовало многих ученых как в нашей стране, так и за рубежом, поскольку именно ветровая нагрузка является для таких сооружений основной, и нередко приводит к их разрушению [с. 247, 4]. Эксперименты по продувке жестких и мягких моделей в аэродинамических трубах проводились многими отечественными и зарубежными исследователями [1, 3, 4, 8, 9, 14]. Однако, в мелкомасштабных моделях удастся добиться только частичного подобия модели реальным условиям. Эксперимент, поставленный В.П. Поляковым, описанный в нескольких статьях [3, 8], «отличается наибольшей широтой» [4], поскольку продувалась крупномасштабная модель усеченной сферической оболочки диаметром 4.2 м и высотой

3.36 м в аэродинамической трубе с площадью поперечного сечения 264 м². Размеры оболочки сопоставимы с размерами реальных сооружений, а исследуемые скорости ветра (12-45 м/с) – с расчетными скоростями ветра в различных ветровых районах.

Помимо больших размеров модели следует отметить, что набор данных для сопоставления представлен достаточно полно: размеры оболочки, параметры материала, направление раскроя, скорость потока и внутреннее давление в различных сочетаниях, перемещения после деформации, аэродинамические коэффициенты, а также наибольшие главные усилия в зоне наибольшего разрежения. Однако, для еще более детального и точного моделирования не хватало деформационной кривой для материала оболочки (прорезиненной капроновой ткани арт. 51-060 толщиной 0.6 мм), а также геометрических параметров рассчитываемой области – размеров поддерживающей конструкции и положения оболочки в потоке. В связи с этим, в численной модели использованы следующие упрощения – рассмотрена область в виде прямоугольного параллелепипеда с «удаленным» подоболочечным пространством, а материал оболочки принят ортотропным, но линейно-упругим.

Задача аэродинамики решалась в *AnsysFluent* помощью метода конечных объемов (МКО), в котором расчетная область (рис. 2), включающая в себя пространство вокруг оболочки, разбивается на множество локальных элементов (расчетных ячеек). Для каждого локального элемента записывается система законов сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме, которая затем преобразуется к системе алгебраических уравнений относительно искомых величин – плотности, скорости, температуры и др. в центрах расчетных ячеек [12].

Интенсивность турбулентности принималась равной 1%, поскольку в аэродинамических трубах она как правило мала. В качестве модели турбулентности принималась довольно широко распространенная двухпараметрическая модель *k-ε*. Шероховатость поверхности оболочки принималась равной 1 мм.

Несмотря на то, что рассматривалось действие установившегося потока, расчет производился как для переходного процесса, поскольку изменение формы оболочки и поиск ею равновесного положения сопровождается затухающими колебаниями, то есть в начальной стадии является нестационарным. Шаги по времени проводились до тех пор, пока оболочка и поток вокруг нее не стабилизировались.

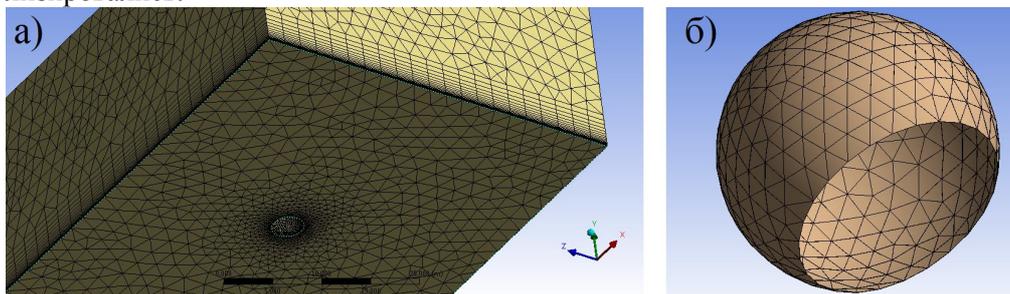


Рис. 2. Расчетные модели для решения задачи: а) аэродинамики; б) строительной механики.

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки (задача строительной механики) решалась в модуле *AnsysMechanical* методом конечных элементов (МКЭ). Оболочка моделировалась плоскими треугольными конечными элементами (КЭ) типа *Shell181* с включенной опцией *KEYOPT(1)=1*, учитывающей только мембранную группу усилий. Последний

параметр играет ключевую роль в достижении сходимости решения задачи. Расчет производился в геометрически нелинейной постановке (активна опция «*LargeDeflection*») с помощью метода Ньютона-Рафсона. Матрица демпфирования задавалась в виде суммы матрицы масс и матрицы жесткости, умноженных на коэффициенты, равные 0.1. Поскольку производился квазистационарный расчет, величина демпфирования влияла только на скорость затухания колебаний в переходном режиме, поэтому величина коэффициента 0.1 была определена путем тестовых расчетов.

Избыточное давление воздуха под оболочкой, необходимое для ее существования, моделировалось в виде постоянной «следящей» нагрузки, т.е. всегда направленной по нормали к оболочке. Корректная оценка влияния избыточного давления на оболочку воздухоопорных сооружений (далее ВОС) является обязательным условием при проведении любых инженерных расчетов данных сооружений. Особенности расчета воздухоопорных оболочек на действие избыточного давления воздуха, те же, что описаны в докладе [7].

Следует отметить одну дополнительную особенность проводимых расчетов: поскольку толщина оболочки крайне мала по сравнению с ее размерами, то пространственное тело заменялось двумерной сферической поверхностью, не имеющей толщины, которая также служила интерфейсом для передачи данных между решателями. Однако, в этом случае, в связи с ограничениями надстройки *SystemCoupling*, отсутствует возможность приложить внутреннее давление в виде нагрузки на внутреннюю поверхность оболочки. Моделирование оболочки объемными КЭ потребовало бы неоправданно сильного сгущения сетки (размер элемента не должен отличаться от толщины оболочки более чем на порядок). В результате, было принято решение моделировать оболочку двумя поверхностями: внешняя является интерфейсной и служит для передачи данных при выполнении связанного расчета, а внутренняя – используется для приложения избыточного давления. Для совместной работы обеих оболочек между ними устанавливалось контактное взаимодействие, что дополнительно усложняло задачу. Кроме этого, близкое размещение (на расстоянии меньше 1 мм) двух поверхностей выходило за пределы точности системы геометрического моделирования. Поэтому, оболочки размещались на расстоянии 6 мм друг от друга, а толщина каждой из них принималась равной 3 мм. Суммарная толщина оболочки *h* увеличилась в 10 раз, поэтому модули упругости материала *E* были уменьшены в 10 раз, чтобы значение жесткости при растяжении, равное произведению *Eh* не изменилось. Как показали расчеты, такая замена привела к незначительным искажениям результатов.

На рис. 2,а в статье [3] приведены относительные перемещения оболочки по нормали к поверхности при действии избыточного давления в 150 и 500 Па. Увеличение нагрузки более чем в три раза привело к росту перемещений лишь в полтора раза, что свидетельствует об увеличении модуля деформации с ростом напряжений, то есть физической нелинейности. Поскольку вид деформационной кривой при дальнейшем росте напряжений в работах [3, 8] не приведен, то было принято решение использовать линейно-упругую ортотропную модель материала. Модули упругости подбирались так, чтобы деформации оболочки в потоке были сопоставимы с результатами эксперимента. Отметим, что перемещения оболочки связаны не столько с ее растяжением, сколько с изменением формы оболочки из-за действия воздушного потока. Соотношение жесткостей по направлению основы и утка было задано таким же, как и в источнике [3], т.е. 13/12. Модуль упругости в направлении основы (меридиональном) принимался равным $E_1 = 200$ МПа, а в направлении утка (окружном) – $E_2 = 185$

МПа. При двусторонних расчетах, эти модули были уменьшены в 10 раз, потому что в 10 раз возрастала толщина материала. Следовательно, полученные в результате расчета напряжения также следовало увеличить в 10 раз.

При расчетах воздухоопорных оболочек большое значение имеет отношение избыточного давления воздуха под оболочкой p_k динамическому давлению потока воздуха q , определяемому как:

$$q = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

где $\rho = 1.225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при температуре 15°C ;

v – скорость потока, м/с.

Отношение ветровой нагрузки к динамическому давлению (скоростному напору) называется аэродинамическим коэффициентом и обозначается C_p . Отрицательные значения C_p соответствуют отсосу. Линия пересечения вертикальной плоскости, проходящей через центр сферы параллельно потоку и поверхности сферы называется главным меридианом. На рис. 3 показано распределение величины C_p по плоскости главного меридиана для одностороннего и двустороннего расчетов (без учета (а) и с учетом (б) деформаций оболочки).

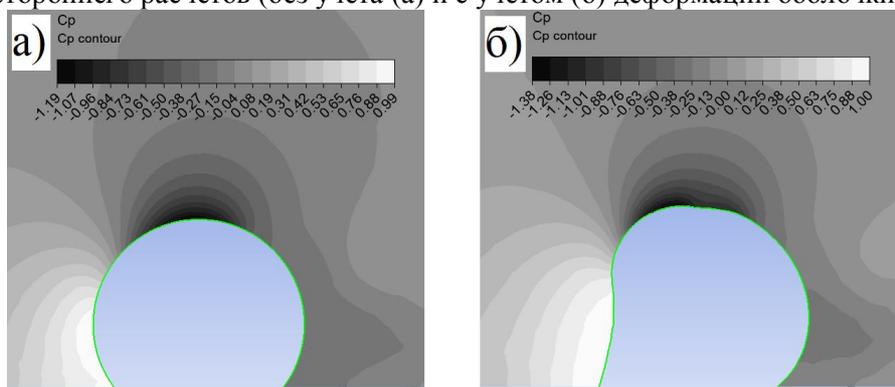


Рис. 3. Распределение аэродинамического коэффициента в плоскости главного меридиана (ветер слева): а) Односторонний; б) Двусторонний связанный расчет

В эксперименте исследовалось распределение аэродинамического коэффициента по главному меридиану при внутреннем давлении $p = 1000$ Па и скоростях потока $v = 12, 20, 30, 40$ и 45 м/с. А также при скорости потока $v = 40$ м/с изменялись значения внутреннего давления: $p = 500, 1000, 1500, 2000$ Па.

Широтный угол θ отсчитывается по часовой стрелке (если смотреть на рис. 3) от горизонтальной оси направленной навстречу потоку и проходящей через центр сферы. Некоторые графики распределения C_p показаны на рис. 4-7.

Можно заметить, что результаты одностороннего расчета слабо изменяются в зависимости от скорости потока. В результате двусторонних расчетов минимальное значение с ростом скоростного напора C_p уменьшается от -1.23 до -1.38 (в эксперименте от -1.16 до -1.4), а различие между результатами одностороннего и связанного расчета увеличивается. Результаты двустороннего связанного расчета при больших скоростях ветра лучше соответствуют эксперименту, как количественно, так и качественно (заметен второй минимум в районе 100° , который отсутствует на результатах одностороннего расчета).

В целом, соответствие эксперименту аэродинамических коэффициентов, полученных в результате двустороннего расчета можно считать удовлетворительным.

При испытании оболочки, перемещения точек ей поверхности измерялись методом стереофотограмметрии [3]. В зоне стереоскопического видения была

расположена передняя часть оболочки, где наблюдаются наибольшие прогибы оболочки вовнутрь.

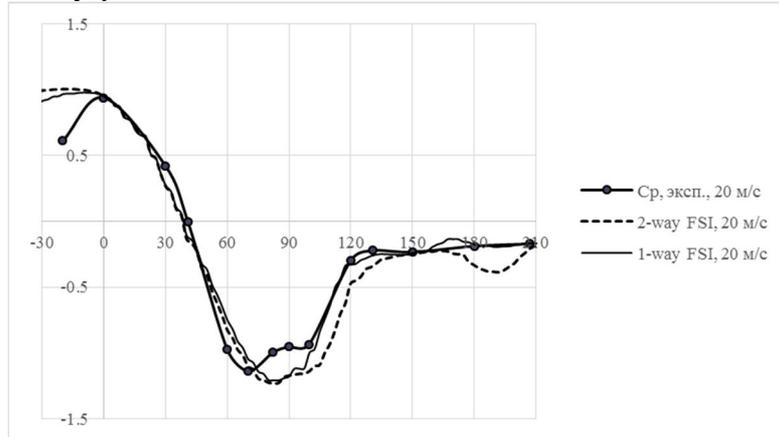


Рис. 4. Распределение аэродинамического коэффициента вдоль главного меридиана при $p = 1000$ Па и $v = 20$ м/с.

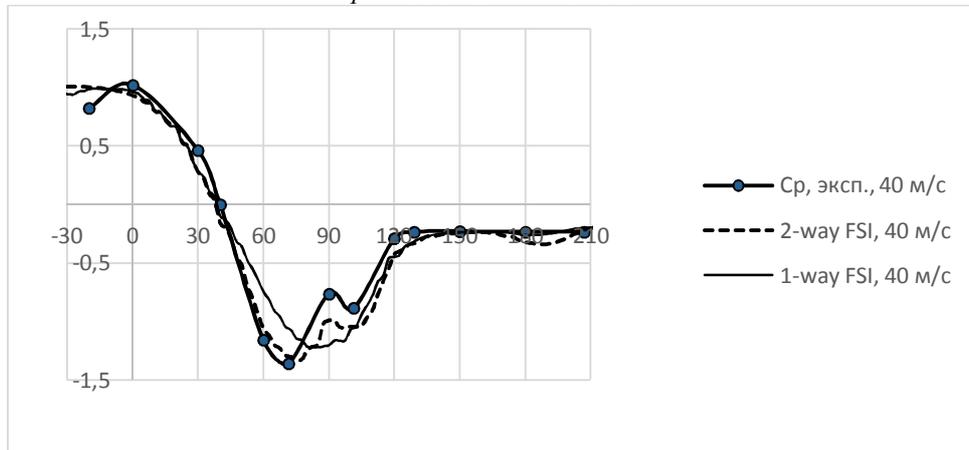


Рис. 5. Распределение аэродинамического коэффициента вдоль главного меридиана при $p = 1000$ Па и $v = 40$ м/с.

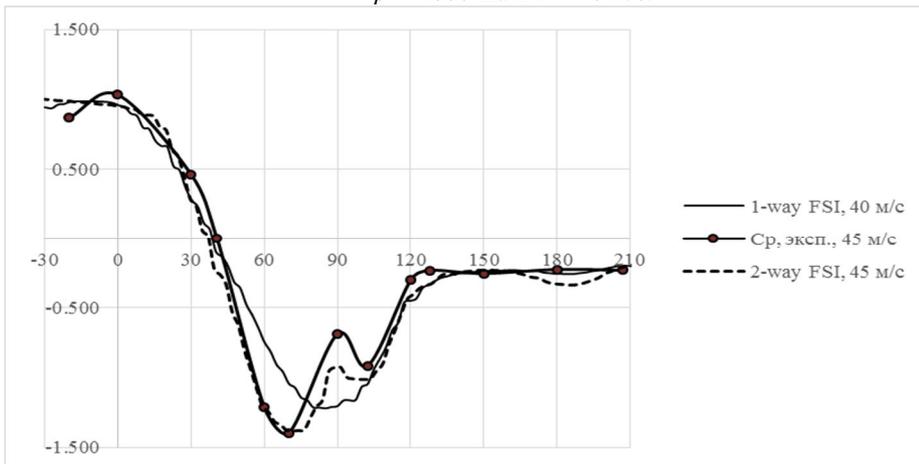


Рис. 6. Распределение аэродинамического коэффициента вдоль главного меридиана при $p = 1000$ Па и $v = 45$ м/с

Общий вид изменения формы оболочки в потоке показан на рис. 8. Сравнение деформаций показано на рис. 8, в), где они изображены в натуральную величину.

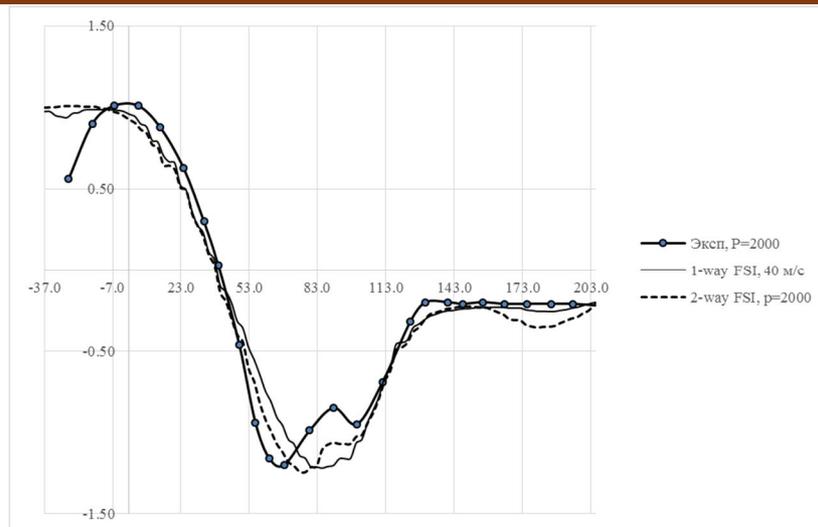


Рис. 7. Распределение аэродинамического коэффициента вдоль главного меридиана при $p = 2000$ Па и $v = 40$ м/с.

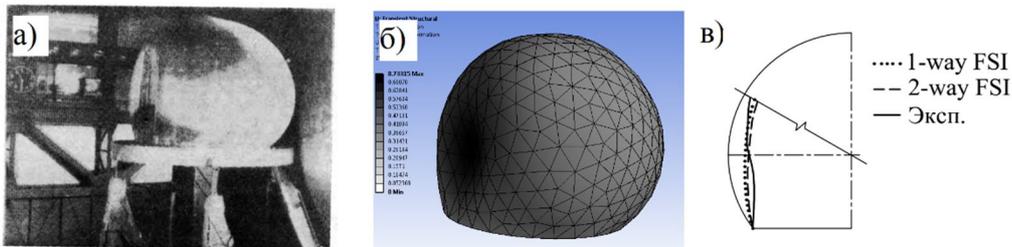


Рис. 8. Деформированная оболочка (поток направлен слева направо):
 а) Фотография эксперимента [3]; б) Результат двустороннего расчета;
 в) Сопоставление деформаций при $p=1000$ Па, $v=40$ м/с

В статье [3] в табл. 2.3 приведены формулы для определения величин главных растягивающих усилий, возникающих в области максимального разрежения (вблизи полюса оболочки) по безмоментной теории оболочек вращения для различных соотношений p/q .

Для наглядности, продублируем табл. 2.3 (см. табл. 1).

Табл. 1

p/q	0.5	0.5-1	1.0-2.0	2.0-5.0
$2N_1/R$	$p + 3.65q$	$p + 3.14q$	$p + 3.29q$	$p + 2.61q$

Для сравнения результатов с *Ansys* произведем расчет главных напряжений в табличной форме для $p = 1000$ Па и скоростях потока $v = 45, 40, 30$ и 20 м/с. Переход от главных натяжений к главным напряжениям осуществляется по формуле:

$$\sigma_1 = N_1/h, \quad (2)$$

где N_1 – главное растягивающее усилие (натяжение), определяемое по табл. 1;

h – толщина оболочки в расчетной модели, $h = 6$ мм = 0.006 м.

Результаты расчета главных напряжений в зоне наибольшего разрежения (отсоса) в *Ansys* обозначим $\sigma_{1\text{-way}}$ и $\sigma_{2\text{-way}}$ соответственно занесем в табл. 2 в отдельные строки. В последней строке сравниваются значения $\sigma_{2\text{-way}}$ и σ_1 . Распределение напряжений показано на рис. 9.

Нетрудно заметить, что разница расчета максимальных напряжений составляет менее 10%, что свидетельствует о получении достаточно качественных результатов. Напряжения, полученные в ходе одностороннего расчета, также

достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента и двустороннего расчета, особенно при меньших скоростях потока, из чего можно сделать вывод, что при стационарных режимах и небольших изменениях формы оболочки односторонний расчет дает решение близкое к двустороннему.

Таблица 2

p , Па	1000	1000	1000	1000
v , м/с	45	40	30	20
$q_{\text{по}}(1)$, Па	1244.4	983.2	553.1	245.8
p/q	0.804	1.017	1.808	4.068
N_1 , Н/м	5152.66	4446.46	2960.51	1723.61
σ_1 , МПа	0.859	0.741	0.493	0.287
$\sigma_{2\text{-way}}$, МПа	0.87	0.75	0.47	0.31
$\sigma_{1\text{-way}}$, МПа	0.84	0.69	0.48	0.31
Δ , %	1.31	1.20	4.98	7.91

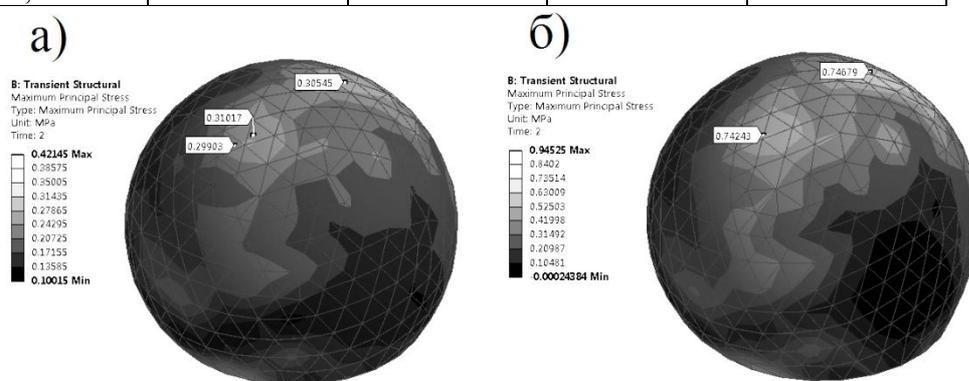


Рис. 9. Распределение главных напряжений вблизи полюса сферы:
а) $p=1000$ Па, $v=20$ м/с, б) $p=1000$ Па, $v=40$ м/с

Выводы: проведенные расчеты в программном комплексе Ansys показали достаточно хорошую сходимость результатов с данными, полученными в ходе экспериментального исследования. Расхождения результатов отчасти можно объяснить упрощением закона деформирования материала до линейного и недостатком информации по конфигурации экспериментальной установки. В работе показано, что при больших скоростях потока учет деформаций оболочки приводит к изменению распределения аэродинамического коэффициента и, как следствие этого, изменению НДС оболочки. Кроме того, учет деформаций оболочки в потоке обязателен при расчете нестационарных процессов, выявлении режима колебаний оболочки в неустановившемся сильно-турбулентном потоке.

В связи с этим намечены следующие направления исследования работы воздухоопорных оболочек:

- разработка и применение физически-нелинейной ортотропной модели материала на основе экспериментальных данных;
- уточнение характеристик демпфирования конструкции;
- анализ существующих и выбор оптимальной модели турбулентности;
- учет совместной работы оболочки с усилением в виде тростовой сети.*

* Работа опубликована по рекомендации оргкомитета Молодежного международного научно-практического семинара молодых ученых и студентов «Современные исследования в области прикладных инженерных наук», 6-8 декабря 2016 г., грант РФФИ №16-38-10439 мол_г.

Литература

1. Алексеев С. А., Голованов Е. В., Смирнов А. М. Экспериментальное исследование нагрузок на сферические оболочки, создаваемых воздушным потоком // Сб. Расчет пространственных конструкций, 1970, вып. XIII, с. 206-210

2. *Афанасьева И.Н.* Адаптивная методика численного моделирования трехмерных динамических задач строительной аэрогидроупругости: дис. ... к.т.н., М.: МГСУ, 2014.
3. *Бейлин Д. А., Поляков В. П., Шмырева В. Н. и др.* Использование стереофотограмметрического метода для исследования напряженно-деформированного состояния мягкой оболочки сферической формы в потоке воздуха // Ученые записки ЦАГИ, 1982, №6, с. 66-76.
4. *Ермолов В.В.* Воздухоопорные здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1980. – 304 с., ил.
5. *Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер Э. и др.* Пневматические строительные конструкции / Под ред. *В.В. Ермолова.* – М.: Стройиздат, 1983. – 439 с., ил.
6. *Кривошапко С.Н.* Пневматические конструкции и сооружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2015, № 3. – С. 45-53
7. *Мокин Н.А., Трушин С.И.* Анализ напряженно-деформированного состояния воздухоопорных сооружений под действием избыточного давления // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник материалов XIX Межд. межвузовской научно-практической конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (27–29 апреля 2016 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, М.: НИУ МГСУ, 2016. – с. 352-355. URL: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2016/stroy_form_2016.pdf (дата обращения: 23.11.2016)
8. *Поляков В.П., Бейлин Д.А.* Экспериментальное исследование ветрового давления на мягкую ортотропную оболочку сферической формы // Сб. Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, вып. 35, Владивосток, 1977. – с. 215-227.
9. *Смирнов А.М., Шмырев И.К.* Распределение давления ветра на усеченные сферические оболочки // Строительная механика и расчет сооружений, 1973, № 5. – с. 18-21.
10. СН 497-77. Временная инструкция по проектированию, монтажу и эксплуатации воздухоопорных пневматических сооружений
11. *Сысоева Е.В., Трушин С.И.* Эволюция большепролетных тентовых конструкций с древних времен до XXI века // Научное обозрение, 2016, №2
12. *Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н. и др.* Основы работы в *Ansys 17.* – М.: ДМК Пресс, 2016. – 210 с.: ил.
13. *Birchall M., Blum R., Bogner-Balz H. et al.* Fabric Structures in Architecture / Edited by *J. I. de Llorens.* Woodhead Publishing Series in Textiles: Number 165. Woodhead Publishing, 2015. – 689 p.
14. *Kawamura S., Kiuchi T.* An experimental study of a one-membrane type pneumatic structure – wind load and response // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, №23, pp. 127-140.

References

1. *Alekseev S. A., Golovanov E. V., Smirnov A. M.* Eksperimental'noe issledovanie nagruzok na sfericheskie obolochki, sozdavaemykh vozдушным потоком, Sb. Raschet prostranstvennykh konstruksiy, 1970, vyp. XIII, p. 206-210
2. *Afanas'yeva I.N.* Adaptivnaya metodika chislenного modelirovaniya trekhmernykh dinamicheskikh zadach stroitel'noy aerogidrouprugosti: dis. ... kand. tekhn. nauk., MGSU, Moskva, 2014.
3. *Beylin D. A., Polyakov V. P., Shmyreva V. N. i dr.* Ispol'zovanie stereofotogram-metriceskogo metoda dlya issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya myagkoy obolochki sfericheskoy formy v potoke vozdukha, Uchenye zapiski TsAGI, 1982, №6, s. 66-76.
4. *Ermolov V.V.* Vozdukhoopornye zdaniya i sooruzheniya, M.: Stroyizdat, 1980. – 304 s., il.
5. *Ermolov V.V., Berd U.U., Bubner E. i dr.* Pnevmaticheskie stroitel'nye konstruktsii, Pod red. V.V. Ermolova, M.: Stroyizdat, 1983, 439 p., il.
6. *Krivoshapko S.N.* Pnevmaticheskie konstruktsii i sooruzheniya, Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy, 2015, № 3, p. 45-53
7. *Mokin N.A., Trushin S.I.* Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vozdukhoopornykh sooruzheniy pod deystviem izbytochnogo davleniya, Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti: sbornik materialov XIX Mezhdunarod-noy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh (27–29 aprelya 2016 g., Moskva) / M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federatsii, M.: NIU MGSU, 2016, p. 352-355. URL: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2016/stroy_form_2016.pdf (data obrashcheniya: 23.11.2016)
8. *Polyakov V.P., Beylin D.A.* Eksperimental'noe issledovanie vetrovogo davleniya na myagkuyu ortotropnyuyu obolochku sfericheskoy formy, Sb. Soobshcheniya DVVIMU po sudovym myagkim obolochkam, vyp. 35, Vladivostok, 1977, p. 215-227.

9. Smirnov A.M., Shmyrev I.K. Raspreделение davleniya vetra na usechennyye sfericheskie obolochki, *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzheniy*, 1973, № 5, p. 18-21.
10. SN 497-77. Vremennaya instruktsiya po proektirovaniyu, montazhu i ekspluatatsii vozdukhopornyykh pnevmaticheskikh sooruzheniy.
11. Syssoeva E.V., Trushin S.I. Evolyutsiya bol'sheproletnykh tentovykh konstruksiy s drevnikh vremen do XXI veka, *Nauchnoe obozrenie*, 2016, №2.
12. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N. i dr. *Osnovy raboty v Ansys 17*, M.: DMK Press, 2016, 210 p.: il.
13. Birchall M., Blum R., Bogner-Balz H. et al. *Fabric Structures in Architecture*, Edited by J. I. de Llorens. Woodhead Publishing Series in Textiles: Number 165. Woodhead Publishing, 2015, 689 p.
14. Kawamura S., Kiuchi T. An experimental study of a one-membrane type pneumatic structure – wind load and response, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1986, №23, pp. 127-140.

NONLINEAR SIMULATION OF AIR-SUPPORTED STRUCTURES

Mokin N.A.

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
129337, Moscow, Russia*

Technique of the nonlinear numerical analysis of the air-supported structures including fluid-structural interaction (FSI) has been described in the present paper. Numerical simulation of the tunnel test of large-scale air-supported model has been carried out as example of using this technique. The comparison of the experimental and numerical results demonstrated applicability of proposed technique to the considered class of problems. Opportunity to develop this technique to the more complicated and advanced problems has been shown, too.

Key words: finite element method, finite volume method, computational fluid dynamics, aeroelasticity, air-supported structures, coupled analysis, fluid-structure interaction.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАРНИРОВ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ РАСЧЕТЕ ЗДАНИЙ НА ПРОГРЕССИРУЮЩЕЕ ОБРУШЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ОГНЕВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Л.А. АВЕТИСЯН, канд. тех. наук, доцент
ФГБОУ ВО "Национальный Исследовательский Московский Государственный
Строительный Университет" (НИУ МГСУ);
г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, avetisyanlevon@inbox.ru

В статье приводятся исследования прочности 25-этажного железобетонного каркаса при прогрессирующем обрушении в условиях огневых воздействий. Принимая углы раскрытия шарниров пластичности, как нормирующие для условия прочности железобетонных элементов, была разработана методика ЭВМ, встроенная в PRMathematica 10, для динамического расчета сжатых железобетонных элементов при огневых воздействиях на основе проведенных экспериментальных исследованиях.

Произведен нелинейный динамический анализ 25-этажного железобетонного каркаса с учетом изменения динамических характеристик железобетонных элементов при пожаре и дана оценка стойкости каркаса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонная колонна, шарниры пластичности, динамическая прочность, прогрессирующее обрушение, огневые воздействия

Сценарии возникновения динамического нагружения в высотных зданиях бывают различными [1,2,3]. В данной статье анализируется наиболее опасный сценарий: мгновенное удаление одного несущего элемента в условиях огневых воздействий. Оставшиеся колонны работают при динамически нарастающей нагрузке [4].

В настоящее время расчет конструкций на динамические нагрузки производится по методу предельных состояний - по несущей способности (предельные состояния первой группы).

При расчете по первой группе рассматриваются три случая достижения предельного состояния: 1а, 1б, 1в (см. рис.1а) [5]. Поскольку аналитически построенные диаграммы деформации, которые имеют криволинейное очертание, выразить одной общей функцией сложно, в дальнейшем будем использовать упрощенную диаграмму "М-1/г" в виде ломаной линии, состоящей из трех прямых (см. рис. 1 б)).

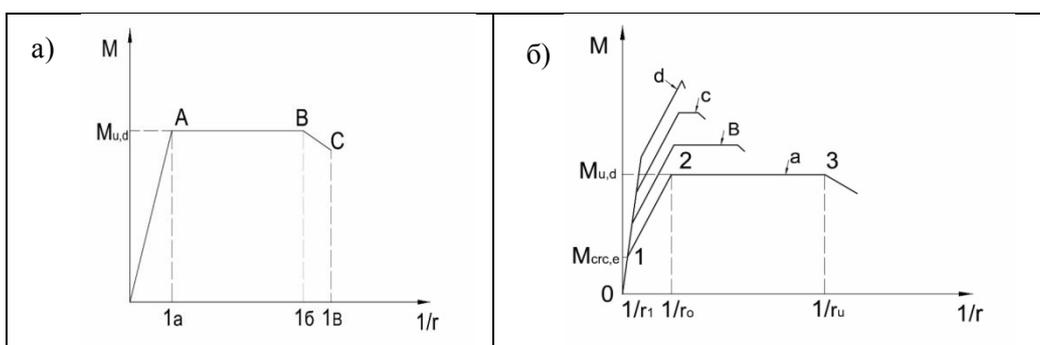


Рис. 1. а) Диаграмма момент-кривизна и предельные состояния, возникающие в элементе, б) Диаграммы деформаций внецентренно сжатых элементов, при различных эксцентриситетах: диаграмма "а" – эксцентриситет e_{01} ; "в" – эксцентриситет e_{02} ; "с" – e_{03} ; "d" – e_{04} ; $e_{04} < e_{03} < e_{02} < e_{01}$

Исследования показывают, что нормировать предельное состояние 1б (см. рис. 1) внецентренно сжатых элементов более удобно по пластическим углам раскрытия в шарнирах пластичности, возникающих за время работы конструкции только в пластической стадии.

Условие прочности конструкции (при образовании в ней n шарниров пластичности) принимает вид:

$$\psi_i \leq \psi_{i,u} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (1)$$

Здесь ψ_i и $\psi_{i,u}$ - пластические углы раскрытия в i -ом шарнире пластичности, полученном из динамического расчета в пластической стадии.

Для расчета величин углов раскрытия пластичности при разных температурах пожара при динамическом нагружении была разработана методика ЭВМ, встроенная в ПРMathematica 10, на основе проведенных экспериментальных исследованиях [6,7].

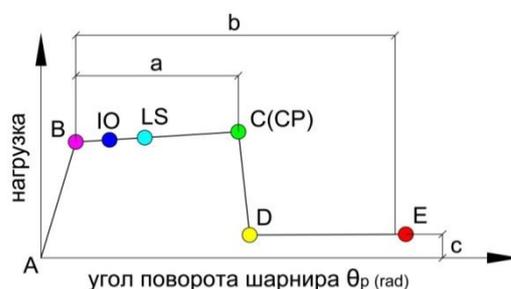


Рис.2. График зависимости угла поворота (раскрытия) пластического шарнира от нагрузки

Определенный интерес представляет задача определения температуры, при которой коэффициент динамичности по материалу будет равен статическому

коэффициенту редукиции при пожаре $K_{dt} = \gamma_t$. Этот момент является исходной точкой развития опасной зоны работы колонны при динамическом нагружении.

На рис. 2 показан угол поворота пластического шарнира от величины нагрузки согласно FEMA 356.

Развитие угла пластического шарнира делится на стадии:

1) $A \triangleright B$ - упругая стадия; 2) $B \triangleright C$ - пластическая стадия; нагрузка, приводящая к образованию пластического шарнира может не привести к разрушению в зависимости от:

- 2а) IO – прямое нагружение;
- 2б) LS –безопасная стадия;
- 2в) CP –предупреждениеразрушения;
- 3) $C \triangleright D$ – остаточный резерв;
- 4) $D \triangleright E$ – полное разрушение.

Разработанная методика позволяет использовать программный комплекс Sap 2000 при расчете многоэтажного каркаса (см. рис.3) и проводить нелинейный динамический расчет сжатых железобетонных элементов с помощью метода Ньютона-Рафсона при разных температурах нагрева, получить величину углов раскрытия шарниров пластичности в разных стадиях деформирования элемента.

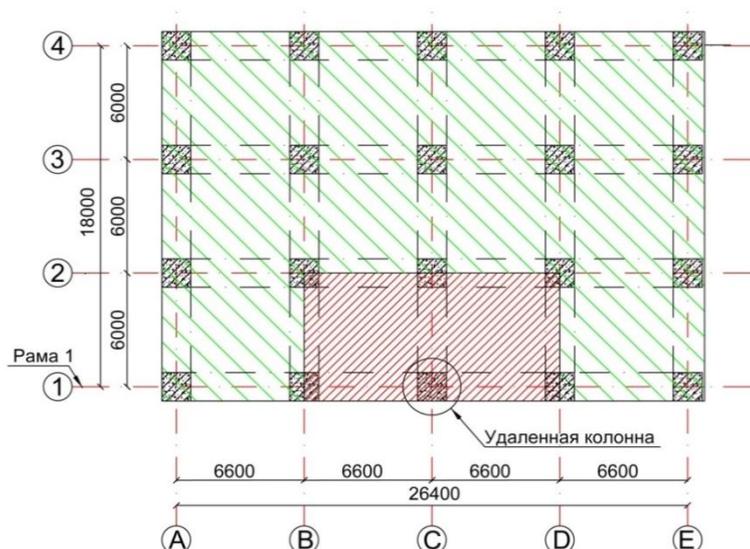


Рис.3. План первого этажа 25-ти этажного каркасного железобетонного здания

Моделирование мгновенного удаления колонны в каркасе здания (см. рис. 4) производится с помощью исключения сил и моментов, действующих над удаляемым элементом, в практике аналогичные силы/моменты прикладываются в противоположном направлении.

Скорость удаления колонны в программе Sap 2000 задается функцией времени. Время удаления колонны принимается меньше 1/10 величины моды периода вертикального колебания здания, которая определяется после проведения нелинейного статического расчета здания, после удаления одного из вертикальных несущих элементов каркаса здания.

Для реальных взрывов время разрушения конструктивного элемента очень короткое (несколько миллисекунд), для удаления колонны принимается близким к нулю (5 мс.), что означает квазимгновенное удаление.

Результаты показали, что наиболее неблагоприятные динамические эффекты возникают, когда колонна разрушается в течение времени близким к нулю (меньше 5 мс.). Динамический отклик каркаса исследуется в определенном промежутке времени при $t=3,0$ сек. Согласно стандарту FEMA 356 все конструктивные элементы достигают нового статического равновесия после трех секунд.

Производя модальный анализ, определяем номер моды и соответствующую величину периода вертикального колебания каркаса (см. рис. 4).

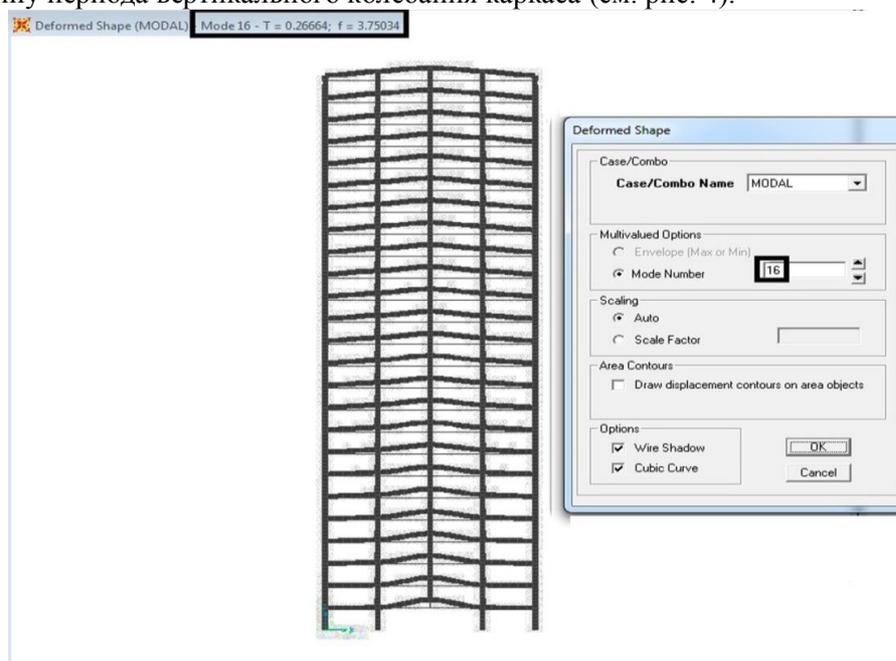


Рис. 4. Величина моды вертикального колебания железобетонного каркаса после удаления колонны С-1

1/10 часть моды вертикального колебания определяет скорость назначения обратной динамической нагрузки в верхнем узле удаленной колонны.

Произведенный нелинейный статический анализ позволяет выявить, что разрушение при удаленной колонне не происходит (стойкость обеспечена), т.е. можно приступить к нелинейному динамическому расчету железобетонного каркаса: $T = 0,16c \Rightarrow t_{dyn} = 0,016c$.

С использованием разработанной методики ЭВМ посчитаем разрушающие нагрузки железобетонных колонн каркаса 25-этажного здания при разных температурах пожара (см. табл.1).

Таблица 1. Величины динамических разрушающих нагрузок железобетонных колонн при разных температурах пожара

Температура ($^{\circ}C$)	Разрушающая (кН)
$T = 20$	$N_{dyn, T=20^{\circ}C} = 11184,2$
$T = 500$	$N_{dyn, T=500^{\circ}C} = 4496,148$
$T = 900$	$N_{dyn, T=900^{\circ}C} = 2567,9$

По нелинейному статическому расчету нагрузка, приходящаяся на колонну первого этажа по координате 1-С, равна 7003 кН. После определения моды вертикального колебания здания (из которого определяем скорость приложения динамической нагрузки) задаем данную нагрузку снизу-вверх (см. рис 5) и вы-

полняем нелинейный динамический анализ здания в нормальных условиях $T = 20^{\circ}\text{C}$ (рис.6) и при температурах 500°C , 900°C (рис.7 и рис. 8), с помощью ПК Sap 2000 версии 12. Задание динамической нагрузки в программном комплексе Sap 2000 производится с помощью функции TimeHistory.

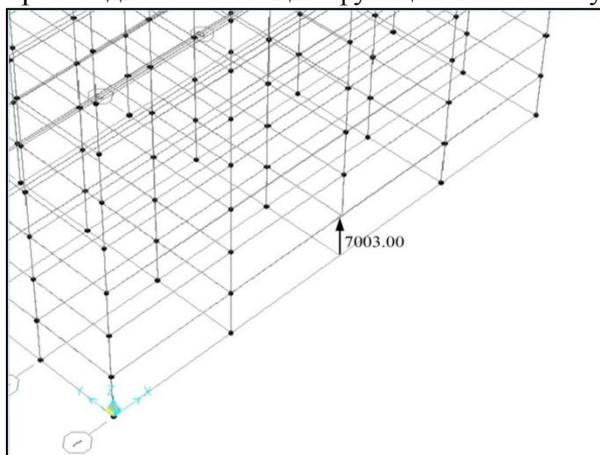


Рис.5. Назначение вертикальной нагрузки в верхнем узле удаленного элемента

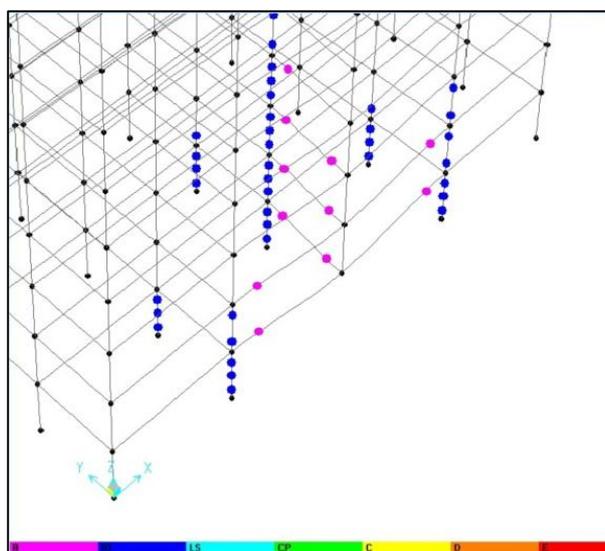


Рис. 6. Состояние пластических шарниров при температуре: $T = 20^{\circ}\text{C}$

Максимальный угол раскрытия шарниров пластичности ($\psi_{\max T}$), определяющий состояние деформирования «ключевых» элементов, находится в состоянии LS -безопасная стадия (при $T = 20^{\circ}\text{C}$ и $T = 500^{\circ}\text{C}$).

На рис. 8 показано состояние пластических шарниров после нелинейного динамического анализа здания при $T = 900^{\circ}\text{C}$, в данном случае разрушение в колоннах фиксируется при нагрузке $P = 5178\text{кН}$.

Аналитический и численный анализ колонн 25-этажного каркасного железобетонного здания показывает, что стойкость каркаса при прогрессирующем обрушении, когда температура пожара $T = 900^{\circ}\text{C}$, не обеспечена, о чем свидетельствует наличие недопустимых деформаций в шарнирах несущих элементов здания - стадия E на рис. 8.

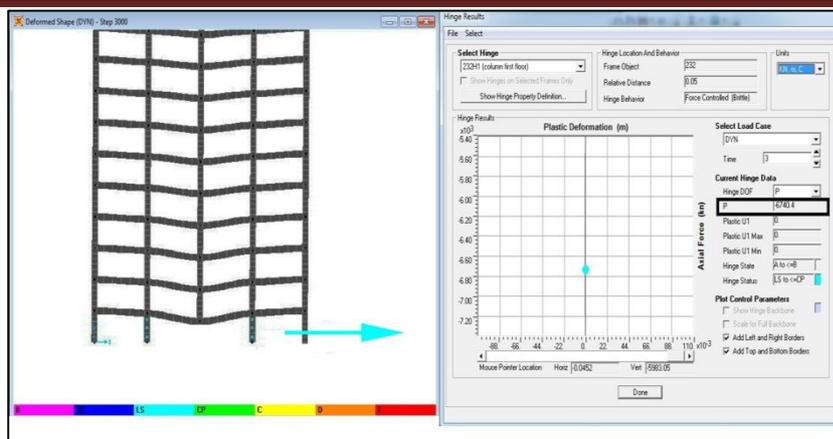


Рис. 7. Состояние пластических шарниров при температуре: $T=500^{\circ}\text{C}$

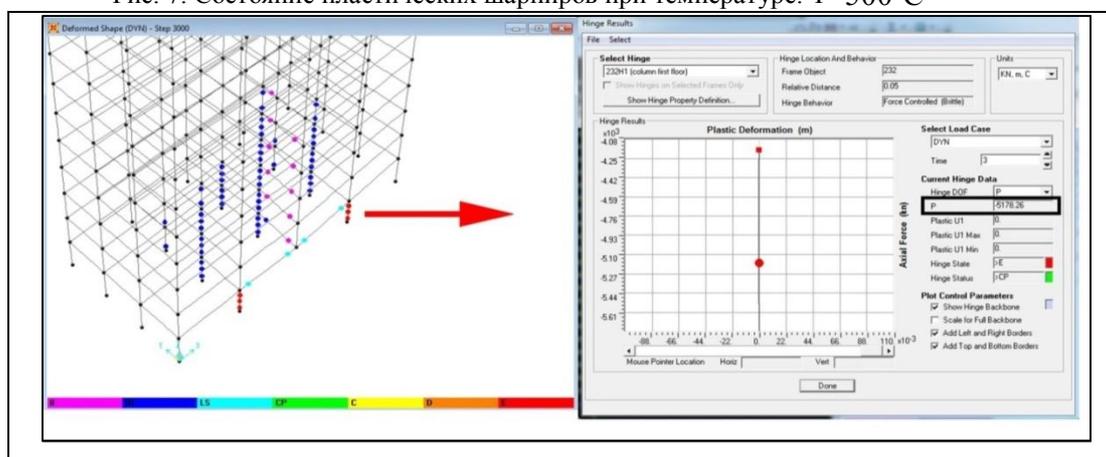


Рис. 8. Состояние пластических шарниров при температуре $T=900^{\circ}\text{C}$

Таким образом, расчет здания при разных термосиловых воздействиях с использованием шарниров пластичности, при расчете которых используются изменения статических и динамических прочностных свойств составляющих материалов, позволяют более точно оценивать сопротивляемость зданий прогрессирующему разрушению.

Исследование железобетонного каркаса в нормальных условиях и в условиях огневых воздействий показывает, что повышение температуры при пожаре приводит к снижению динамической прочности несущих элементов значительно больше, чем статической прочности: при $T=900^{\circ}\text{C}$, динамическая прочность составляет 46% статической прочности.*

* Работа опубликована по рекомендации оргкомитета Молодежного международного научно-практического семинара молодых ученых и студентов «Современные исследования в области прикладных инженерных наук», 6-8 декабря 2016 г., грант РФФИ №16-38-10439 мол_г.

Л и т е р а т у р а

1. Курлапов, Д. В. Воздействие высоких температур пожара на строительные конструкции//Инженерно-строительный журнал, №4, 2009. – С.41–43.
2. Милованов, А.Ф. Огнестойкость и огнесохранность зданий и сооружений. Промышленное и гражданское строительство, №9, 2002. – С.39–40.
3. Mindeguia, J.C., Carré, H., Pimienta, P. &LaBorderie, C. "Nouvelletechnique demesuresdes deformation sradialesdubéton à hautestempératures", In RencontresUniversitaires de Génie Civil. LaGrandeMotte. June 1-2, 2006. Pp. 44– 49.

4. *Tamrazyan A.G.* К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение. *Бетон и железобетон*, 2001, № 5. – С.8.

5. *Tamrazyan A.G.* Особенности работы высотных зданий// *Жилищное строительство*. 2004, № 3. – С.19– 20.

6. *Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A.* Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures *Procedia Engineering*. № 153 (2016) Vol.721– 725

7. *Tamrazyan A. G.* Динамический расчет сжатых железобетонных элементов с учетом огневых воздействий/А. Г. Тамразян, Л. А. Аветисян // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615847. Зарегистрировано в Государственном реестре РФ программ для ЭВМ 26 мая 2015 года.

8. *Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A.* Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” Volume 86, 2016.

References

1. *Kurlapov, D.V.* Воздействие высоких температур пожара на строител'nye konstruksii. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, №4, 2009, s.41–43.

2. *Milovanov, A.F.* Ognestoykost' i ognesokhrannost' zdaniy i sooruzheniy. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, №9, 2002, s. 39–40.

3. *Mindeguia, J.C., Carré, H., Pimienta, P. & LaBorderie, C.* "Nouvelletechniquedemesure des déformations radialesdubéton à hautes températures", In *Rencontres Universitaires de Génie Civil. LaGrandeMotte*. June 1-2, 2006, pp. 44-49.

4. *Tamrazyan A.G.* К оценке риска чрезвычайных ситуаций по основным признакам его проявления на сооружение. *Бетон и железобетон*, 2001, № 5, с. 8.

5. *Tamrazyan A.G.* Osobennosti raboty vysotnykh zdaniy// *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2004, № 3, s. 19-20.

6. *Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A.* Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures, *Procedia Engineering*, № 153, 2016, Vol. 721–725

7. *Tamrazyan A.G.* Dinamicheskij raschet szhatykh zhelezobetonnykh elementov s uchetom ognevnykh vozdeystvii/ A. G. Tamrazyan, L. A. Avetisyan // Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2015615847. Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reestre RF programm dlya EVM 26 maya 2015 goda.

8. *Tamrazyan A.G., Avetisjan L.A.* Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” Volume 86, 2016.

USING PLASTIC HINGES IN THE CALCULATION OF THE BUILDINGS ON THE PROGRESSIVE COLLAPSE UNDER FIRE EXPOSURE

Levon Avetisyan

Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337

In this article, the study of the strength of a 25-storey reinforced concrete frame against progressive collapse under fire conditions is presented. Taking the angles of disclosure of plastic hinges as norming for the strength of reinforced concrete elements, a computer technique program has been developed, included in PR Wolfram Mathematica 10 for the dynamic calculation of compressed reinforced concrete elements under fire exposure on the basis of the conducted experimental studies. Dynamic calculation of the strength of eccentrically compressed reinforced concrete columns was carried out, working in normal conditions and under high temperatures. The diagram «moment-curvature» and the graph of change of the static and dynamic strength of the column depending on the temperature were developed. Nonlinear dynamic analysis of a 25-storey reinforced concrete frame was conducted, taking into account the changes of the dynamic characteristics of reinforced concrete elements under fire and, the estimation of resistance of the frame was given.

Key words: reinforced concrete column, plastic hinges, dynamic strength, progressive collapse, fire exposure.

Сейсмостойкость сооружений

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО СТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Г.А. ДЖИНЧВЕЛАШВИЛИ, *д.т.н., профессор МГСУ*

С.В. БУЛУШЕВ, *инженер*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

E-mail: guram2004@yandex.ru, sergey.bulushev@gmail.com

В статье рассмотрено практическое применение методики нелинейного статического анализа сейсмостойкости зданий и сооружений. Произведен расчет одноэтажной стальной рамы нелинейным статическим и нелинейным динамическим методами. В результате анализа полученных результатов расчета показана значимость высших форм колебаний и необходимость анализа их влияния на реакцию системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмостойкость, нелинейный метод расчета, нелинейный статический метод расчета, нелинейный динамический метод расчета, акселерограмма.

Основная задача проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах – предотвращение обрушения системы в целом при редком (сильном) землетрясении уровня МРЗ [5]. Линейно-спектральный метод не может учесть возможность развития в несущих и ненесущих элементах конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений.

При решении проблемы с помощью положений, удовлетворяющих требованиям СП 14.13330.2014 [9], возникает ряд трудностей [2 – 4, 6 – 8, 13 – 15, 20, 21, 24, 25], к основным из которых относятся: чувствительность к алгоритмам конечно-элементного моделирования, резкая избирательность акселерограмм к отдельным собственным частотам собственных колебаний и отсутствие в нормах «прозрачной» методики.

Линейно-спектральный метод не может учесть возможность развития в несущих и ненесущих элементах конструкций неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений. Таким образом, при расчете на МРЗ необходимо применение нелинейных методов.

Нелинейный динамический метод является наиболее точным. Но для его применения необходимо наличие представительного набора акселерограмм. Расчет сложных моделей требует больших затрат машинного времени. Этот метод требует привлечения высококвалифицированных специалистов, и в настоящее время не может быть использован рядовым проектировщиком.

Более простым методом, позволяющим учесть нелинейную работу конструкций, является нелинейный статический метод (НСМ). Для расчета этим методом могут применяться спектры сейсмического воздействия, используемые в линейно-спектральной методике. В настоящее время НСМ применяется при проектировании сейсмостойких конструкций зданий и сооружений в различных странах мира, в том числе, КНР, Индии, США, Иране, стран Евросоюза и др. [2, 4, 5, 7, 10 – 12, 16 – 19, 23]. Входящие в него расчетные процедуры интегрированы в такие комплексы, как SAP2000, ETABS, Midas Gen и др.

Целью данной работы является сравнение результатов расчета типового стального производственного сооружения на 9-ти бальное землетрясение нелинейным статическим методом, по методике, описанной в [1] и нелинейным динамическим методом [2, 4, 6].

В качестве расчетной схемы принята жесткая стальная рама (рис.1). Перекрытие принято абсолютно жестким. Диаграмма деформирования колонн при-

нята упругопластической с упрочнением (рис. 2). Основная частота собственных колебаний конструкции 1.455 Гц.

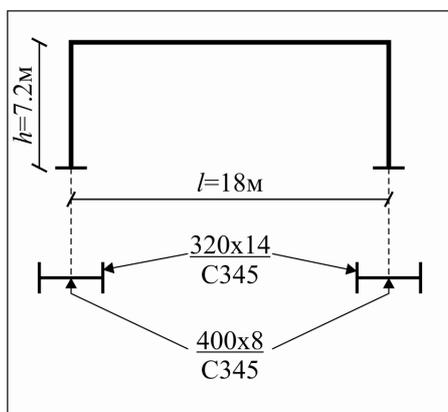


Рис. 1. Расчетная схема

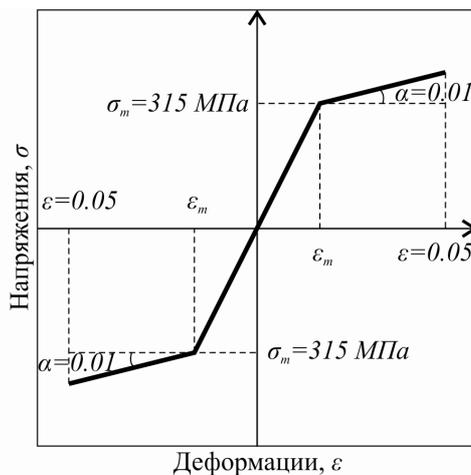


Рис. 2. Диаграмма деформирования стали

Расчет нелинейным динамическим методом производился в программном комплексе LS-DYNA на три различные акселерограммы: Бухарестского землетрясения (рис. 3), Спитакского землетрясения (рис. 4) и Калифорнийского землетрясения (рис. 5).

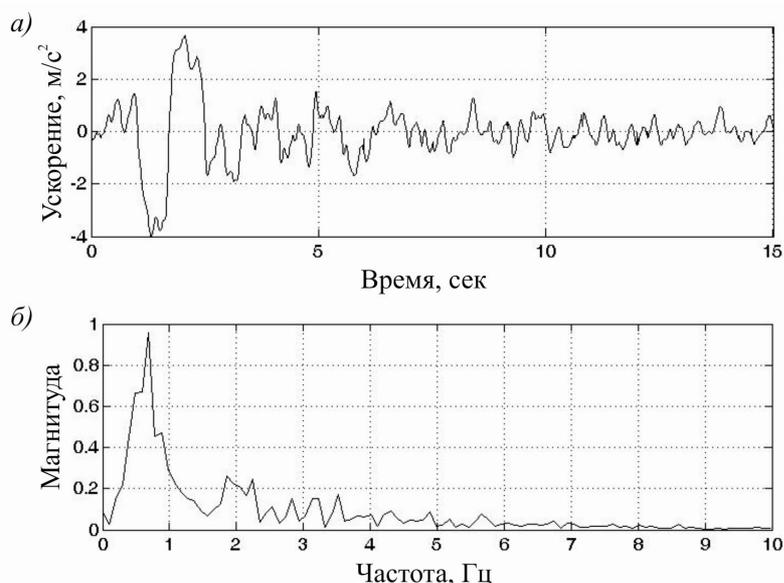


Рис. 3. Бухарестское землетрясение (4.03.1977):
а) акселерограмма; б) спектральный состав

Расчет нелинейным статическим методом производился в программном комплексе LIRA 10.4 по методике, описанной в [1]. Боковая нагрузка по высоте сооружения прикладывалась согласно распределению сейсмических сил по п. 5.5-5.10 [9]. Расчет производился с учетом Р-Δ эффекта.

Далее приведены результаты расчета. На графиках показаны максимальные перемещения верха конструкции (в спектральных координатах), полученные нелинейным статическим методом (рис. 6, а), и перемещения верха конструкции во временной области, полученные нелинейным динамическим методом (рис. 6, б-з).

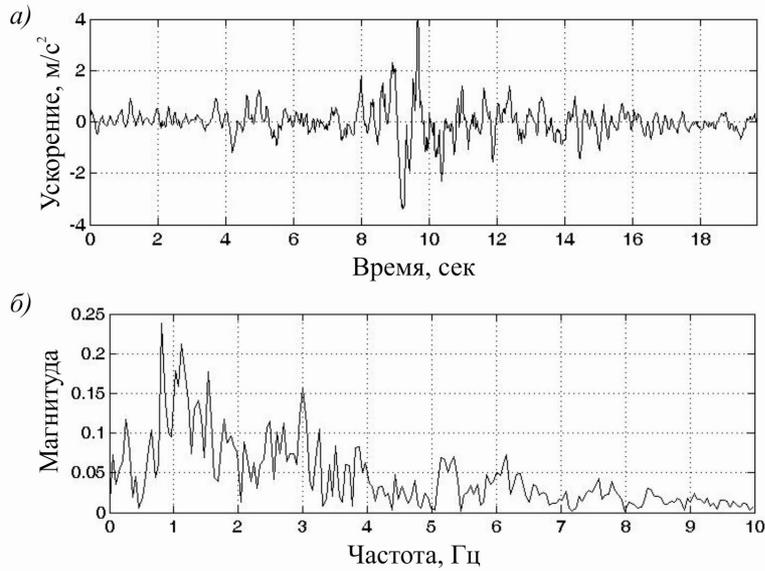


Рис. 4. Спитакское землетрясение (7.12.1988):
а) акселерограмма; б) спектральный состав

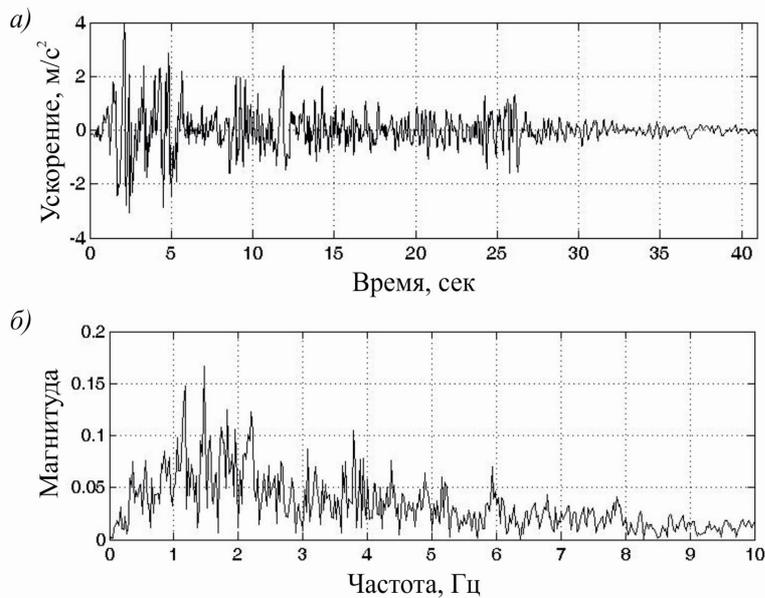


Рис. 5. Калифорнийское землетрясение (18.05.1940): а) акселерограмма;
б) спектральный состав

Далее приведены графики зависимости поперечной силы в основании от перемещения верха конструкции для нелинейного статического и нелинейного динамического методов (рис. 7, а-в).

Результаты расчета сведены в табл. 1.

Заключение

1. Апробирована методика нелинейного статического анализа, предложенная в [1].

2. Апробация предложенной методики нелинейного статического расчета в сравнении с нелинейным динамическим расчетом показала приемлемые результаты для Спитакского землетрясения и большие расхождения для Бухаресткого и Калифорнийского землетрясений.

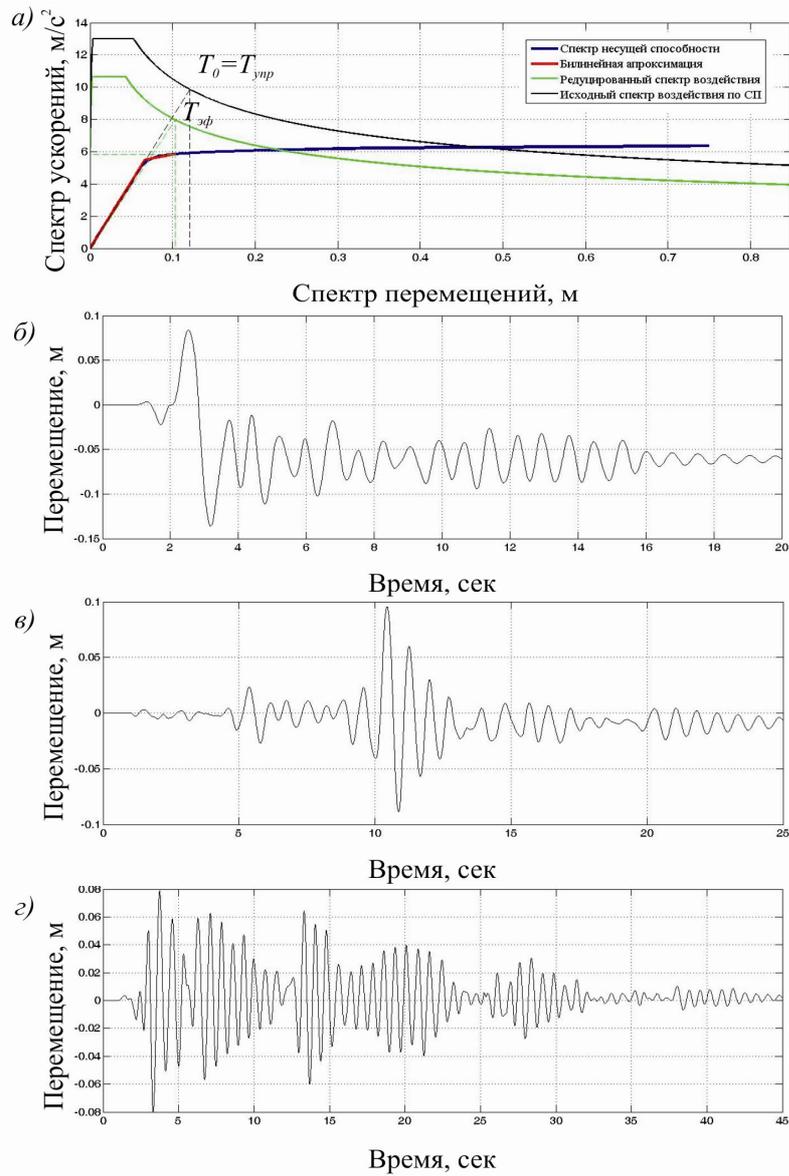


Рис. 6. Перемещения верха конструкции: а) нелинейный статический метод; нелинейный динамический метод; б) Бухарестское землетрясение; в) Спитакское землетрясение; г) Калифорнийское землетрясение

Таблица 1. Результаты расчета

Методы расчета	Доминирующая частота воздействия, Гц	Разница с основной собственной частотой конструкции, %	Магнитуда	Максимальное перемещение верха, м	Разница с нелинейным статическим методом, %	
Нелинейный статический метод	-	-	-	0.103	-	
Нелинейный динамический метод	Бухарестское землетрясение	0.684	-52.99	0.958	0.136	32.04
	Спитакское землетрясение	0.815	-43.99	0.238	0.095	-7.77
	Калифорнийское землетрясение	1.47	1.03	0.166	0.080	-22.33

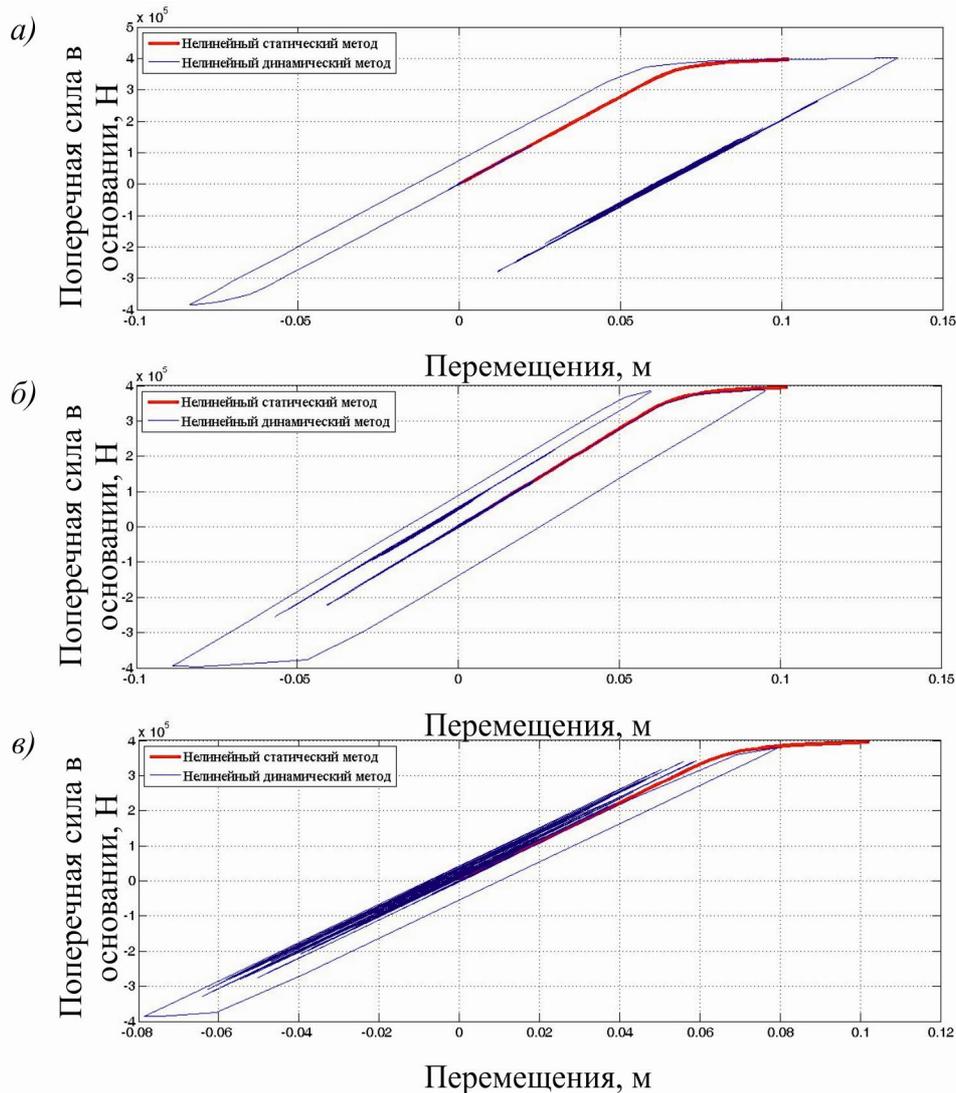


Рис. 7. Зависимость поперечной силы в основании от перемещения верха конструкции: а) Бухарестское землетрясение; б) Спитакское землетрясение; в) Калифорнийское землетрясение

3. Это связано с тем, что:

а) Бухарестское землетрясение содержит узкий спектр частот, сосредоточенный на частоте, близкой к основной частоте колебаний конструкции. Это приводит к неконсервативной оценке реакции системы с помощью нелинейного статического метода;

б) Спитакское землетрясение содержит несколько доминантных частот, близких к основной частоте колебаний конструкции. Таким образом, нелинейный статический метод с использованием проектного спектра воздействия достаточно точно описывает реакцию системы;

в) Калифорнийское землетрясение содержит широкий спектр частот, которые вносят свой вклад в реакцию конструкции. Тем самым, расчет нелинейным статическим методом по первой форме колебаний завышает реакцию системы.

4. Проведенное исследование показывает значимость высших форм колебаний и необходимость анализа их влияния на реакцию системы [2, 13].

Л и т е р а т у р а

1. Джинчвелашивили Г.А., Булушев С.В., Колесников А.В. Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений // Журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2016, № 5, С. 39-47.
2. Джинчвелашивили Г.А. Нелинейные динамические методы расчета зданий и сооружений с заданной обеспеченностью сейсмостойкости //автореферат дисс. на соискание ученой степени докт. техн. наук. – М.: МГСУ, 2015. – 46 с.
3. Задоян П.М. Оценка сейсмостойкости методом спектра несущей способности. // Известия Ереванского государственного университета архитектуры и строительства, 2/2009.
4. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения) // Москва: МГСУ, 2012. (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ). - 192 с.
5. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А., Дзержинский Р.И. Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. 2016. № 1. - с. 71-81.
6. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А. Оценка работы зданий и сооружений за пределами упругости при сейсмических воздействиях // XXI Russian-Slovak-Polish Seminar, "Theoretical Foundation of Civil Engineering", Moscow-Archangelsk 03.07 – 06.07.2012. - pp. 177 – 186.
7. Немчинов Ю.И., Марьенков Н.Г., Хавкин А.К., Бабик К.Н. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости (с учетом рекомендаций ЕВРОКОДА 8, международных стандартов и требований ДБН): монография/ - Киев: Минрегион Украины, ГП НИИСК, – 2012. – 53 с.
8. Соснин А.В. Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Bulletin of the South Ural University . Ser. Construction Engineering and Architecture. 2016, vol. 16, No 1 - pp. 12 – 19.
9. СП 14.13330.2014. «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*», М., 2014;
10. Applied Technology Council (ATC). «Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings». Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, CA, 1996.
11. Applied Technology Council (ATC). «Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures». Rep. No. ATC-55, Redwood City, CA, 2005.
12. Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
13. Chopra A.K. Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum/ Chopra A.K., Goel R.K. // Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000: - paper №1612.
14. Clough R. W., Penzien J. Dynamics of Structures (Third Edition). - Computers & Structures, Inc. 1995 University Ave., Berkeley, CA 94704, USA. – 752 p.
15. Datta T.K. Seismic Analysis of Structures, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2010. – p. 464.
16. European Standard. Eurocode-Basis of structural design: EN 1990: 2002(E). – April, 2002. – 87 p.
17. FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.
18. FEMA-274. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.
19. FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, D.C. – November, 2000.
20. Fajfar P., Krawinkler H. (2004), 'Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation - Proceedings of the International Workshop Bled, Slovenia, June 28 - July 1, 2004. PEER Report 2004/05, College of Engineering, University of California, Berkeley.
21. Gupta B., (1998) 'Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings', Ph.D. Dissertation, Orlando, Florida, University of Central Florida.

22. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation accelerograms parameters for a "Construction-Basis" model, nonlinear properties of the soil taken into account / Procedia Engineering –2014 - vol.91, pp. 54-57.

23. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part 1: 1997 Edition. Building Seismic Safety Council (USA), - 342p.

24. Paz M. Structural Dynamics: Theory and Computation / by Mario Paz, William Leigh. – 5th ed., 2004. – 844p.

25. Themelis S. Pushover analysis for seismic assessment and design of structures, Heriot-Watt University, School of Built Environment, 2008.

References

1. Dzhinchvelashvili G.A., Bulushev S.V., Kolesnikov A.V. Nelinejnyj staticheskiy metod analiza sejsmostojkosti zdaniy i sooruzhenij // Zhurnal «Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij». 2016, № 5, pp. 39-47.

2. Dzhinchvelashvili G.A. Nelinejnye dinamicheskie metody rascheta zdaniy i sooruzhenij s zadannoj obespechennost'ju sejsmostojkosti //avtoreferat diss. na soiskanie uchenoj stepeni dokt. tehn. nauk. – M.: MGSU, 2015. – 46 p.

3. Zadojan P.M. Ocenka sejsmostojkosti metodom spektra nesushhej sposobnosti. // Izvestija Erevanskogo gosudarstvennogo universiteta arhitektury i stroitel'stva, 2/2009.

4. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. Problemy ucheta nelinejnostej v teorii sejsmostojkosti (gipotezy i zabluzhdenija) // Moskva: MGSU, 2012. (Biblioteka nauchnyh razrabotok i proektov MGSU). - 192 p.

5. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Dzerzhinskij R.I. Filosofija mnogourovnevnogo proektirovaniya v svete obespechenija sejsmostojkosti sooruzhenij // Geologija i geofizika Juga Rossii. 2016. № 1. - pp. 71-81.

6. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. Ocenka raboty zdaniy i sooruzhenij za predelami uprugosti pri sejsmicheskij vozdeystvijah // XXI Russian-Slovak-Polish Seminar, "Theoretical Foundation of Civil Engineering", Moscow-Archangelsk 03.07 – 06.07.2012. - pp. 177 – 186.

7. Nemchinov Ju.I., Mar'enkov N.G., Havkin A.K., Babik K.N. Proektirovanie zdaniy s zadannym urovnem obespechenija sejsmostojkosti (s uchetoj rekomendacij EVROKODA 8, mezhdunarodnyh standartov i trebovanij DBN): monografija/ - Kiev: Minregion Ukrainy, GP NIISK, – 2012. – 53 p.

8. Sosnin A.V. Ob osobennostyah metodologii nelinejnogo staticheskogo analiza i ego soglasovanosti s bazovoj normativnoj metodikoj rascheta zdaniy i sooruzhenij na dejstvie sejsmicheskij sil // Bulletin of the South Ural University. Ser. Construction Engineering and Architecture. 2016, vol. 16, No 1 - pp. 12 – 19.

9. SP 14.13330.2014. «Stroitel'stvo v sejsmicheskij rajonah. Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-7-81*», M., 2014;

10. Applied Technology Council (ATC). «Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings». Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, CA, 1996.

11. Applied Technology Council (ATC). «Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures». Rep. No. ATC-55, Redwood City, CA, 2005.

12. Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.

13. Chopra A.K. Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum/ Chopra A.K., Goel R.K. // Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000: - paper №1612.

14. Clough R.W., Penzien J. Dynamics of Structures (Third Edition). - Computers & Structures, Inc. 1995 University Ave., Berkeley, CA 94704, USA. – 752 p.

15. Datta T.K. Seismic Analysis of Structures, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2010. – p. 464.

16. European Standard. Eurocode-Basis of structural design: EN 1990: 2002(E). – April, 2002. – 87 r.

17. FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.

18. FEMA-274. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. – October, 1997.

19. FEMA 356. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, D.C. – November, 2000.

20. Fajfar P., Krawinkler H. (2004), 'Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation - Proceedings of the International Workshop Bled, Slovenia, June 28 - July 1, 2004. PEER Report 2004/05, College of Engineering, University of California, Berkeley.

21. Gupta B., (1998) 'Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings', Ph.D. Dissertation, Orlando, Florida, University of Central Florida.
22. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Busalova M.S. Calculation accelerograms parameters for a "Construction-Basis" model, nonlinear properties of the soil taken into account / Procedia Engineering –2014 - vol.91, pp. 54-57.
23. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures. Part 1: 1997 Edition. Building Seismic Safety Council (USA), - 342p.
24. Paz M. Structural Dynamics: Theory and Computation / by Mario Paz, Wil-liam Leigh. – 5th ed., 2004. – 844p.
25. Themelis S. Pushover analysis for seismic assessment and design of structures, Heriot-Watt University, School of Built Environment, 2008.

ACCURACY EVALUATION OF THE NONLINEAR STATIC ANALYSIS METHOD OF THE STRUCTURES SEISMIC RESISTANCE

G.A. DZHINCHVELASHVILI, S.V. BULUSHEV
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
129337, Moscow, Russia*

The article considers the practical application of a technique of nonlinear static analysis of seismic resistance of buildings and structures. The calculation of one-storey steel frame, by nonlinear static and nonlinear dynamic methods is fulfilled. As a result of analysis of the calculation, results show the importance of higher vibration modes and the need to analyze their effects on the system response.

Key words: seismic resistance, nonlinear analysis method, nonlinear static analysis method, nonlinear dynamic analysis method, pushover analysis, accelerogram



Расчет подземных сооружений

УДК.622.45, 622.807.8, 628.511

НЕСУЩИЕ ПОРОДНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ОСВОЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.И. ГОЛИК*, доктор технических наук, профессор

Ю.И. РАЗОРЕНОВ*, доктор технических наук, профессор

В.И. ЛЯШЕНКО**, кандидат технических наук

*ФГБОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технологический университет», Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

E-mail: v.i.golik@mail.ru. тел. 8 952 839 45 99.

**Министерство топлива и энергетики Украины,
52204, Украина, г. Желтые Воды, ул. Петровского, 37.

факс: 8 056 52 2 32 97; inform@iptzw.dp.ua

Показано, что оптимизация мероприятий по созданию строительных конструкций в подземных выработках является действенным способом улучшения показателей подземных и строительных геотехнологий. Надежность управления состоянием вмещающих горные объекты породных массивов увеличивается при использовании остаточной несущей способности разрушенных пород с корректировкой размеров структурных блоков технологическими средствами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность, труд, руда, риск, травматизм, целики, кровля, пролет, крепление, экономика.

При подземных работах уровень опасности работников, сооружений и техники зависит от природной среды и совокупности организационных, технологических и человеческих факторов. Комплекс мер по обеспечению строительных конструкций в подземных выработках является составной частью теории управления горным давлением.

Оценке риска управления конструкциями в породных массивах посвящены работы М.И. Агошкова, А.А. Борисова, К.В. Руппeneйта, В.Д. Слесарева, Г.Л. Фисенко В.А. Шестакова, С.В. Ветрова, Г.Н. Кузнецова, Н.В. Баклашова, Л.Г. Протосени, К.З. Ушакова, Ю.И., А.В. Фролова и др.

Безопасность подземных сооружений из природных и композитных строительных материалов оценивают сравнением фактического значения риска с его условной величиной, устанавливаемой на основе анализа аналогичных ситуаций в сравнимых условиях.

Качественная оценка уровня риска базируется на анализе опасных факторов с нанесением ущерба работающему персоналу и сооружениям в подземных выработках[1]:

$$R = R_1 \times R_2 \times R_3,$$

где R – уровень риска; R_1 – вероятность возникновения опасного события; R_2 – вероятность формирования условий для возникновения опасности; R_3 – вероятность нанесения ущерба.

Для объективности оценки сравниваемые строительные геотехнологии должны быть сопоставимы по максимальному количеству признаков: мощности рудного тела, углу падения, характеристике руд и вмещающих пород, производственной мощности предприятия и стоимости работ.

При сравнении технологии показатель риска может быть определен по одному основному параметру, например, по несущей способности конструкции из обнаженных горными работами пород кровли.

Устойчивость породного рудовмещающего массива является случайной величиной, зависящей от природных и техногенных факторов, но может быть представлена как сумма независимых друг от друга слагаемых с нормальным распределением (условие Ландберга). Гипотезы горного давления исходят из положения о перераспределении первоначальных напряжений в массиве в результате техногенного вмешательства [2-5]. Скальным массивам больше других отвечает гипотеза горного давления М.М. Протождяконова.

Над выработкой образуется свод естественного равновесия, в пределах которого нижний слой пород – кровлю выработки нагружают вышележащие породы в пределах свода (рис.1).

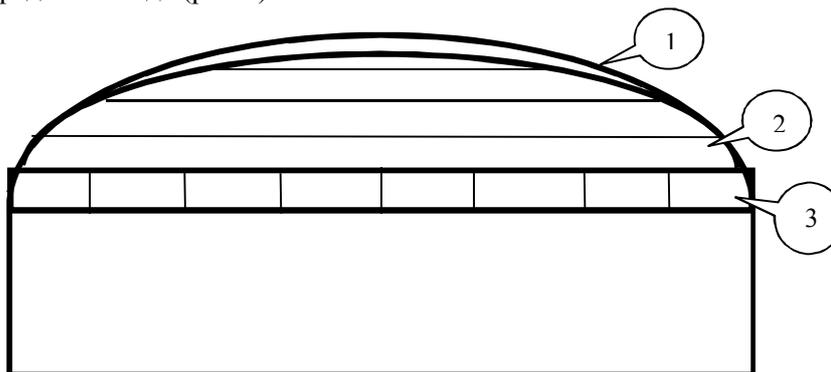


Рис.1. Механизм работы несущей конструкции: 1- граница свода естественного равновесия пород; 2- отслоившиеся породы; 3- несущая конструкция из заклинившихся породных блоков

Исследованные гипотезы устойчивости выработок не в полной мере учитывают сложность геологической структуры месторождений, поэтому нами предложена методика определения пролетов обнажений пород кровли с учетом расположения нахождения выработки относительно рудовмещающих структур.

Методика исходит из того, что потеря несущей способности слоя заклинившихся пород в кровле выработки происходит при скалывании напряженных участков структурных блоков на высоте, примерно $2/3$ высоты структурного блока (рис. 2).



Рис.2. Схема разрушения заклинившихся породных блоков

Управляющее воздействие на прочность системы заключается в использовании параметров, при которых прочность несущих породных конструкций обеспечивается за счет остаточной прочности пород и напряжений бокового распора, которые могут быть увеличены путем упрочнения пород.

Управление прочностью породных конструкций состоит в реализации остаточной несущей способности пород ограничением величины пролетов выработок. В пределах геомеханически сбалансированных участков могут быть применены минимизированные по затратам труда и материалов подземные и строительные геотехнологии.

Наибольшую опасность для подземных объектов представляет критическая деформация породного массива в случае недостаточной прочности природных или искусственно создаваемых опорных конструкций - целиков, которая зависит от пролетов обнажения породной кровли между опорами (рис.3).

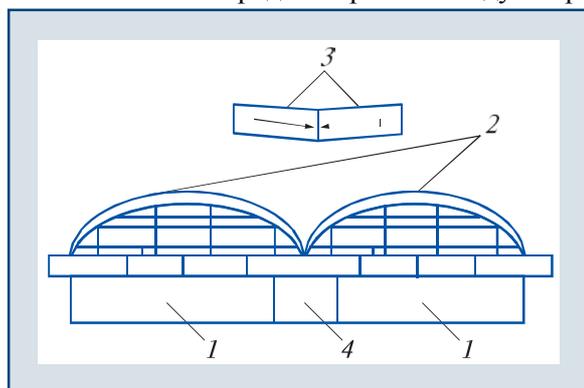


Рис.3. Схема взаимодействия целиков и пролетов обнажения пород: 1 — очистные выработки; 2 — своды естественного равновесия; 3 — взаимодействующие между собой структурные блоки пород; 4 — целик

Для повышения безопасности природно-техногенных конструкций запас прочности целиков стремятся увеличить, при чем увеличиваются потери руды в рудных целиках и затраты строительных материалов на сооружение искусственных опор. Таким образом, показатели безопасности и эффективности подземных горных работ зависят от оптимального соотношения размеров несущих опор и пролетов обнажений горных выработок [6-9].

Процессы в скальных массивах имеют стохастический характер, исходная информация для решения технико-экономических задач в горной промышленности имеет вероятностный характер, поэтому оценка поведения массива и его влияние на подземные объекты представляет собой серьезную проблему, актуальность которой возрастает при увеличении масштабов вторжения горными работами в Земные недра.

Поведение вмещающих горных пород в процессе обнажения пород кровли исследованы нами в действующем выемочном блоке подземного рудника [10-12].

На первом этапе исследования расчетом по альтернативным методикам определили величину пролета обнажения пород кровли. Затем поведение пород кровли исследовали путем доведения пролета выработки до обрушения кровли кусочно - припасовочным разрушением боковой породной стенки выработки взрыванием зарядов в шпурах (рис.4).

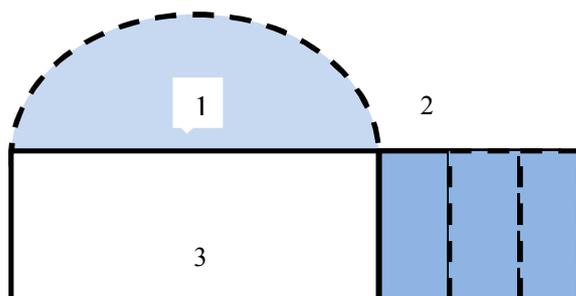


Рис.4. Моделирование величины предельного пролета выработки: 1– исходный свод естественного равновесия; 2– отбиваемые породные прирезки; 3– исходный пролет выработки

Обрушение пород произошло при пролете выработки 32 м, в то время как расчетная величина предельного пролета по различным методикам варьировалась в пределах 12 – 55 м (рис.5).



Рис.5. Расчетный и фактический пролет обнажения пород кровли

Расчеты прочности несущих породных конструкций для идентичных пород дают весьма различающиеся результаты и не могут использоваться при расчете размеров безопасных пролетов без учета местных особенностей.

Они могут быть подразделены на инженерные методы (на основе теорий прикладной механики - строительной механики, сопротивления материалов) и геомеханические (на основе теорий классической механики) с использованием вероятностно-статистических методов (табл.1).

Реальные скальные массивы состоят из породных структурных блоков, ограниченных геологическими нарушениями различного масштаба. До известного момента блоки при подработке образуют устойчивые несущие конструкции при условии надежного естественного самозаклинивания по криволинейным поверхностям, имеющим форму свода [13-14].

Таблица 1. Методы расчета устойчивых пролетов обнажений кровли

Характеристика массива	Методы			Основные учитываемые факторы
	Геомеханические	Инженерные		
		Несущий элемент	Гипотеза горного давления	
Квазисплошной с гравитационным полем напряжений	Механика сплошной среды	Слой	Свод давления В.Д. Слесарева Свод обрушения М.М. Протодяконова, И.М. Цимбаревича, Н.М. Покровского и др.	Угол анизотропии, коэффициент структурного ослабления, мощность элемента
Квазисплошной с нарушениями сплошности и гравитационно-тектоническим полем напряжений		Плита		
Дискретный с гравитационно-тектоническим полем напряжений		Балка		
Дискретный с гравитационно-тектоническим полем напряжений	Механика дискретной среды	Плита или балка	Зона обрушения А.А. Борисова Свободные консоли Г.Н. Кузнецова	Коэффициент структурного ослабления, размеры структурных блоков, прочность.

Выработки различаются в рамках предлагаемой типизации (табл.2).

Таблица 2. Типизация горных выработок по форме контакта с породами

Тип	Положение выработки относительно пород кровли	Условия образования несущей конструкции
I	Пересекает шов и подзону мелкой трещиноватости разлома на всю их мощность и располагается в породах основной кровли	Прочность естественного заклинивания структурных блоков пород
II	Пересекает шов и частично подзону мелкой трещиноватости и располагается в породах непосредственной кровли	Прочности естественного заклинивания и дополнительного упрочнения пород
III	Не полностью пересекает шов и располагается в породах непосредственной кровли	Упрочнение пород

Зоны шва, мелких трещин и крупных трещин отличаются масштабом и качеством геологических нарушений, что определяет устойчивость подземных объектов (табл.3).

Таблица 3. Типизация вмещающих выработку пород по нарушенности

Тип	Вмещающий выработку массив	Характеристика пород кровли
1	Зона шва	Мелкие дискретные разности пород со слабым сцеплением
2	Зона мелких трещин	Средней величины структурные блоки пород с преимущественно залеченными трещинами
3	Зона крупных трещин	Сравнимой с размерами выработок величины структурные блоки пород с залеченными трещинами

Надежность несущей породной конструкции зависит от пространственного положения выработки относительно зон геологических нарушений. Наиболее опасны горные выработки, расположенные в геологических нарушениях первого падения (рис.6).

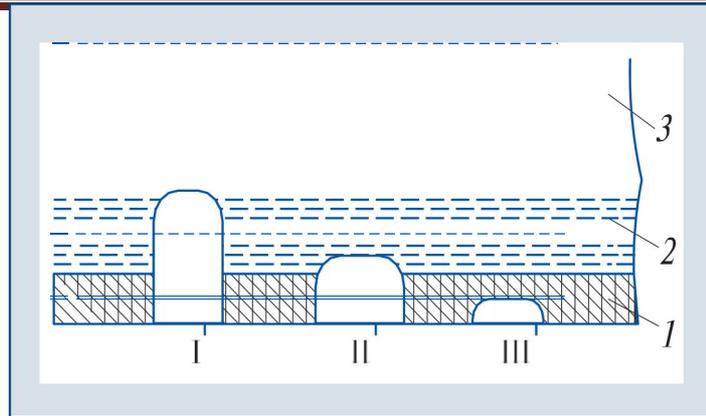


Рис.6. Типизация выработок по устойчивости: 1, 2, 3 - соответственно, подзоны шва, мелких трещин и крупных трещин I, II, III - типы выработок;

Возможностью возникновения и надежностью несущих конструкций характеризуются горные выработки, расположенные в породах крутого падения, у которых высота заклинивающихся породных блоков больше их длины.

Очистные выработки более устойчивы, когда в породах кровли в результате заклинивания структурных породных блоков образуется трехшарнирная арка (рис.7).

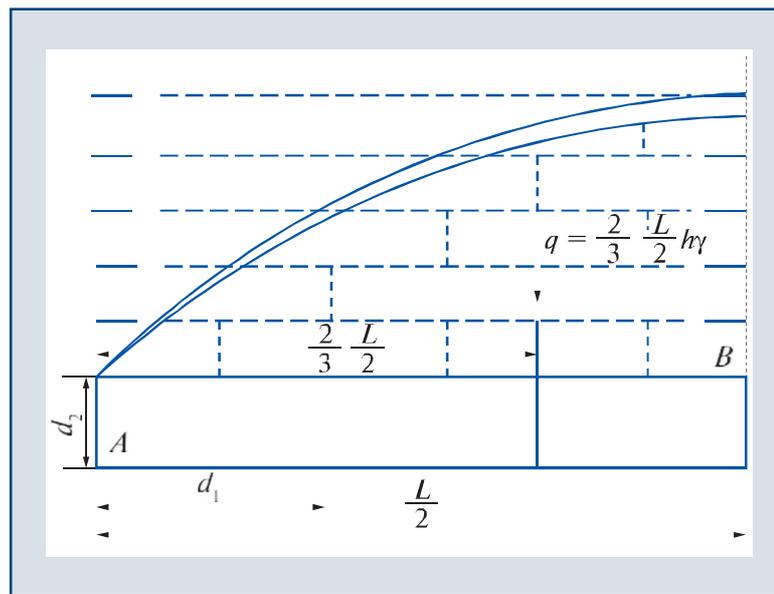


Рис. 7. Схема образования шарнирной арки: L – ширина пролета предельного свода естественного равновесия пород; h – высота предельного свода естественного равновесия пород; γ – объемная масса пород; d_1 – горизонтальный размер структурного блока основной кровли, м; А и Б – шарниры арки

Если очистная выработка пересекает шов и подзону мелкой трещиноватости рудовмещающей структуры на всю их мощность, ее кровля сложена структурными блоками соизмеримых по величине с размерами выработок, которые обеспечивают надежную несущую конструкцию.

Выработка I типа:

Сила, действующая на половину пролета [8]:

$$q = \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{2} h_0 \gamma, \text{ где } h_0 = \frac{L}{2V_0}, \text{ откуда } q = \frac{L\gamma}{6V_0},$$

где L - длина пролета обнажения, м; h_0 - мощность основной кровли, м; γ - объемный вес пород, т/м³; V_0 - соотношение вертикального и горизонтального размеров структурного блока пород.

$$\text{Момент силы } q \text{ относительно точки } A: \quad M_q = \frac{L_0^3 \gamma}{18V_0} .$$

$$\text{Сила распора:} \quad T = \frac{10R''_{сж} \cdot d_{02}}{K_2 \cdot 3} .$$

$$\text{Момент силы } T \text{ относительно точки } A: \quad M_T = T \frac{5}{6} d_{02} = \frac{10R''_{сж} 5d_{02}^2}{18K_2} ,$$

где d_{02} – вертикальный размер структурного блока пород основной кровли, м.

$$\text{Из равенства моментов при } R''_{сж} = R'_{сж} = R_{сж}: \quad L_I = 1,713 \sqrt{\frac{10R_{сж} d_{02}^2 V_0}{K_2 \gamma}} ,$$

где $R''_{сж}$ и $R'_{сж}$ – отношение временного сопротивления пород сжатию в направлении распора свода и в направлении действия массы пород; K_2 – коэффициент запаса; γ - объемная масса пород, т/м³.

Если очистная выработка пересекает шов и не полностью подзону мелкой трещиноватости, в кровле находятся структурные блоки сравнительно малых размеров (до 1,0 м) и надежность несущей конструкции уменьшается.

Выработка II типа:

$$\text{Сила, действующая на половину пролета:} \quad q_{II} = \frac{L}{2} b \gamma ,$$

где b – мощность непосредственной кровли, м.

$$\text{Момент силы } q_{II} \text{ относительно точки } A: \quad M_{q_{II}} = \frac{L}{2} b \gamma \frac{L}{4} = \frac{L^2 b \gamma}{8} .$$

$$\text{Сила распора:} \quad T = \frac{10R_{сж}}{K_2} \times \frac{1}{3} d_{II2} ,$$

где d_{II2} - вертикальный размер структурного блока пород непосредственной кровли, м.

Момент силы распора T относительно точки A :

$$M_T = T \frac{5}{6} d_{II2} = \frac{10R_{сж} 5d_{II2}^2}{18K_2} .$$

$$\text{Из равенства моментов:} \quad L_{II} = 1,49 d_{II2} \sqrt{\frac{10R_{сж}}{K_2 \gamma b}} .$$

Выработка III типа

$$\text{Сила, воздействующая на половину пролета:} \quad q_3 = \frac{L_3}{2} b \gamma .$$

$$\text{Момент силы } q_3 \text{ относительно точки } A: \quad M_q = \frac{L_3}{2} b \gamma \frac{L}{4} = \frac{L_3^2 b \gamma}{8} .$$

$$\text{Сила распора:} \quad T = \frac{10R_{сж}}{K_2} \times \frac{2}{3} d_{II2} .$$

Момент силы распора T относительно точки A :

$$M_T = T \frac{5}{3} d_{II2} = \frac{10R_{сж} 10d_{II2}^2}{K_2 \cdot 9} .$$

$$\text{Из равенства моментов для двух слоев в кровле:} \quad L_{III} = 2,98 d_{II2} \sqrt{\frac{10R_{сж}}{K_2 b \gamma}} ;$$

Несущая способность породной конструкции обеспечивается при условии:

$$L_{\phi} < L_{III} = 1,49 d_{n2n} \sqrt{\frac{10R_{сж}}{K_2 \gamma b}},$$

где n - количество скрепляемых слоев кровли (2...12).

Допустимый пролет закрепленного плоского обнажения непосредственной кровли:

$$L_3 = mL = 1,49 md_{n2n} \sqrt{\frac{10R_{сж}}{K_2 b \gamma}},$$

где m - коэффициент увеличения пролета в зависимости от количества скрепленных штангами слоев (2...6).

Увеличение размеров очистных камер более определенного для данных условий предела опасно возникновением критических напряжений в породах и соответствующих им деформаций в виде разрушения целиков и массива (рис.8) [15-16].

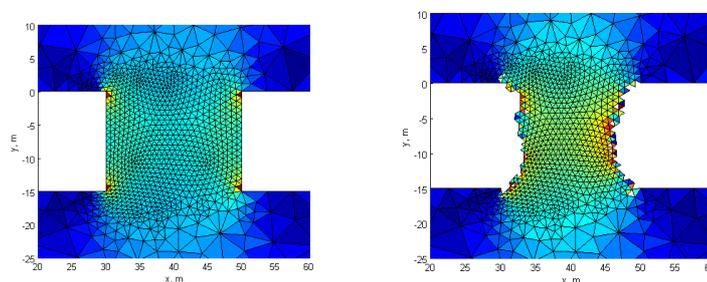


Рис.8. Модель разрушения несущего целика при увеличении пролетов выработки

Эффективность использования породных конструкций достигается комплексным улучшением показателей подземных и строительных геотехнологий (рис.9).



Рис.9. Эффективность использования породных конструкций

Результаты выполненного исследования согласуются с данными публикаций на затронутую тему в научной литературе [17-20].

Выводы

1. При подземной разработке месторождений и подземном строительстве разрушенные горные породы обладают остаточной прочностью и при соответствующих условиях способны создавать прочные конструкции.

2. Использование породных конструкций при горных работах является действенным способом улучшения показателей подземных и строительных геотехнологий.

3. Надежность управления состоянием вмещающих горные объекты породных массивов увеличивается при использовании мер корректировки размеров структурных блоков технологическими средствами.

4. Использование породных конструкций создает экономический эффект, уменьшая потери в целиках и повышая качество добываемых минеральных ресурсов, и сокращая затраты труда и материалов на управление горным давлением.

Л и т е р а т у р а

1. Шестаков В.А., Шаляпин В.Н., Литовченко Т.В. Теория оптимизации и совершенствования подземной разработки сложных рудных залежей. - Новочеркасск. - 2005. - 391 с.

2. Голик В.И., Хадонов З.М., Габараев О.З. Управление технологическими комплексами и экономическая эффективность разработки рудных месторождений. - Владикавказ, 2001. 390 с.

3. Пагиев К.Х., Голик В.И., Габараев О.З. Научно-технологические технологии добычи и переработки руд // Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет). – Владикавказ, 1998. – 510 с.

4. Вагин В.С., Голик В.И. Проблемы использования природных ресурсов южного федерального округа // Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению годгот. 650100 "Приклад. геология", по горно-геол. специальности / Владикавказ, 2005. – 191 с.

5. Голик В.И. Природоохранные технологии разработки рудных месторождений. – Москва, 2014. – 190 с.

6. Ветров С.В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд. – М.: Наука, 1975. – С.207.

7. Голик В.И. Концептуальные подходы к созданию мало и безотходного горно-рудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий // Горный журнал. 2013. № 5. – С. 93-97.

8. Голик В.И., Брюховецкий О.С., Габараев О.З. Технологии освоения месторождений урановых руд. – Москва, 2007. – 131 с.

9. Голик В.И. Природоохранные технологии управления состоянием массива на геомеханической основе / В.И. Голик, В.И. Комащенко.- М.: КДУ, 2010. – 355 с.

10. Голик В.И. Разработка месторождений полезных ископаемых. - Владикавказ: МАВР, 2006. – 978 с.

11. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. – Москва, 2014. – 129 с.

12. Ляшенко В.И., Коваленко В.Н., Голик В.И., Габараев О.З. Бесцементная закладка на горных предприятиях. – Москва, 1992. – 95 с.

13. Голик В.И., Комащенко В.И. Природоохранные технологии управления состоянием массива на геомеханической основе. – М.:КДУ, 2010. – 555 с.

14. Голик В.И., Разорёнов Ю.И., Комащенко В.И., Харебов, Г.З. Повышение безопасности труда при разработке нагорных месторождений оптимизацией технологических процессов // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – №7. –С.36-43.

15. Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production // Archives of Mining Sciences. – 2010. – Vol. 55. – No. 2. – P. 263–278.

16. Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). – Verlag : Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. – 875 p.

17. Golik V., Komashenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Т. 7. – № 5. – С. 401- 405.

18. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgatyi L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // Social Sciences (Pakistan). – 2015. Т. 10. № 6. – С. 750-754.

19. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region // Social Sciences (Pakistan). – 2015. – Т. 10. – № 6. – С. 746-749.

20. Голик В.И., Полухин О.Н., Петин А.Н., Комащенко В.И. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА // Горный журнал. – 2013. № 4. С. 91-94.

References

1. Shestakov V.A., Shal'japin V.N., Litovchenko T.V. *Teoriya Optimizacii i Sovershenstvovaniya Podzemnoj Razrabotki Slozhnyh Rudnyh Zalezhej*. Novocherkassk. 2005. 391 p.
2. Golik V.I., Hadonov Z.M., Gabaraev O.Z. *Upravlenie Tehnologicheskimi Kompleksami i Jekonomicheskaja Jeffektivnost' Razrabotki Rudnyh Mestorozhdenij*, Vladikavkaz, 2001, 390 p.
3. Pagiev K.H., Golik V.I., Gabaraev O.Z. *Naukoemkie Tehnologii Dobychi i Pererabotki Rud*, Severo-Kavkazskij gorno-metallurgicheskij institut (Gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet). Vladikavkaz, 1998, 510 p.
4. Vagin V.S., Golik V.I. *Problemy Ispol'zovaniya Prirodnih Resursov Juzhnogo Federal'nogo Okruga: Ucheb. posobie dlja studentov vuzov, obuchajushhijhsja po napravleniju podgot. 650100 "Priklad. geologija", po gorno-geol. special'nosti*, Vladikavkaz, 2005, 191 p.
5. Golik V.I. *Prirodoohrannye Tehnologii Razrabotki Rudnyh Mestorozhdenij*, Moskva, 2014, 190p.
6. Vetrov S.V. *Dopustimye Razmery Obnazhenij Gornyh Porod pri Podzemnoj Razrabotke Rud*. M., Nauka, 1975, 207 p.
7. Golik V.I. *Konceptual'nye podhody k sozdaniyu malo i bezothodnogo gornorudnogo proizvodstva na osnove kombinirovaniya fiziko-tehnicheskikh i fiziko-himicheskikh geotehnologij*, *Gornyj zhurnal*, 2013, № 5, p. 93-97.
8. Golik V.I., Brjuhoveckij O.S., Gabaraev O.Z. *Tehnologii Osvoenija Mestorozhdenij Uranovyh Rud*, Moskva, 2007, 131 p.
9. Golik V.I., Komashhenko V.I. *Prirodoohrannye Tehnologii Upravlenija Sostojaniem Massiva na Geomehanicheskoy Osnove*, M.: KDU, 2010, 355 p.
10. Golik V.I. *Razrabotka Mestorozhdenij Poleznyh Iskopaemyh*, Vladikavkaz: MAVR, 2006, 978 p.
11. Golik V.I. *Special'nye Sposoby Razrabotki Mestorozhdenij*, Moskva, 2014, 129 p.
12. Ljashenko V.I., Kovalenko V.N., Golik V.I., Gabaraev O.Z. *Bescementnaja Zakladka Na Gornyh Predpriyatijah*, Moskva, 1992, 95 p.
13. Golik V.I., Komashhenko V.I. *Prirodoohrannye Tehnologii Upravlenija Sostojaniem Massiva na Geomehanicheskoy Osnove*, M.:KDU, 2010, 555 p.
14. Golik V.I., Razorjonov Ju.I., Komashhenko V.I., Harebov, G.Z. *Povyshenie bezopasnosti truda pri razrabotke nagornyh mestorozhdenij optimizaciej tehnologicheskikh processov*, *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2015, №7, p. 36-43.
15. Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production, *Archives of Mining Sciences*, 2010, Vol. 55, No. 2, p. 263–278.
16. Wittke W. *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*, Verlag : Wilhelm Ernst & Sohn, 2014, 875 p.
17. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, № 5, p. 401- 405.
18. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgatyi L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste, *Social Sciences (Pakistan)*, 2015, vol. 10, № 6, p. 750-754.
19. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region, *Social Sciences (Pakistan)*, 2015, vol. 10, № 6, p. 746-749.
20. Golik V.I., Poluhin O.N., Petin A.N., Komashhenko V.I. *Jekologicheskie problemy razrabotki rudnyh mestorozhdenij KMA*, *Gornyj Zhurnal*, 2013, № 4, p. 91-94.

BEARING ROCK STRUCTURES DURING THE DEVELOPMENT OF UNDERGROUND FACILITIES

V. I. Golik, J. I., Razorenov, V. I. Lyashenko

It is shown that optimization of measures for creation of building structures in underground mines is an effective way to improve the performance of underground construction and Geotechnology. Reliability management as containing objects of mountain rock masses increased by the use of residual bearing capacity of the destroyed rocks with the adjustment of the dimensions of the structural units of the process means.

Key words: security, labor, ore, risk, injury, pillars, roof, span, mount, economy.

Механика жидкости

НАДЕЖНОСТЬ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТА УЧЕБНОГО КОРПУСА РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ

А.П. СВИНЦОВ*, доктор технических наук, профессор,
Т.В. СКРИПНИК**, ассистент;
М.Т. ГУСАМОВ***, студент магистратуры,
Т.К. КРИВОШАПКИНА****, студентка магистратуры
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва
*svintsovap@rambler.ru; **tvscripnic@rambler.ru
gmt94@mail.ru; *kr.tatiana@bk.ru

Представлены результаты исследования показателей надежности системы отопления учебного здания РУДН. Показано, что за период эксплуатации с 2004 г. по 2016 г. отказы пластинчатых теплообменников и насосных агрегатов не зафиксированы. В процессе эксплуатации оборудования индивидуального теплового пункта неисправности запорной и предохранительной арматуры насосных агрегатов не выявлены. После устранения неисправностей задвижек и обратных клапанов работа насосных агрегатов возобновлялась. Вероятность безотказной работы индивидуального теплового пункта в течение отопительного периода составляет в среднем 0,952.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплообменник, задвижка, обратный клапан, надежность, интенсивность отказов, неисправность.

Введение

Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) представляет собой сложную систему с большим количеством элементов совместно работающего оборудования, предназначенного для подачи необходимого количества теплоты для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения здания. Теплоэнергетическая эффективность функционирования индивидуальных тепловых пунктов в значительной степени зависит от слаженной работы оборудования, которое характеризуется неоднородностью качественных признаков работоспособности. В этой связи оценка эксплуатационной надежности оборудования позволяет эффективно решать задачу обеспечения бесперебойной его работы.

В настоящее время проблеме повышения надежности оборудования тепловых пунктов не уделяется должного внимания. Это не позволяет давать объективную оценку технического состояния элементов оборудования и обеспечивать улучшение условий его эксплуатации.

В рамках исследования выявлено дерево отказов оборудования ИТП, а также предложена методика оценки показателей надежности.

Индивидуальные тепловые пункты и их эксплуатационная надежность, как объекты современного исследования

Теплоэнергетическая эффективность функционирования индивидуальных тепловых пунктов в значительной степени зависит от надежности эксплуатируемого оборудования. Исследования российских и зарубежных специалистов направлены на совершенствование технической оснащенности индивидуальных тепловых пунктов и повышение их теплоэнергетической эффективности.

В работах [1, 2] показано, что применение систем автоматического управления тепловыми пунктами позволяет повысить эффективность их функционирования на 35%. Энергосберегающий эффект может быть получен за счет устранения перетоков теплоносителя и оптимизации режимов теплоснабжения.

Аналізу процессов смешения потоков теплоносителей с различными температурами посвящено исследование, результаты которого представлены в [3].

Выявлены особенности потерь эксергии, составляющих в системах вентиляции 42,1% и в системах отопления 46,3%.

Для повышения эффективности использования тепловой энергии в системах отопления и горячего водоснабжения предлагают использовать блочные тепловые пункты [4], характеризующиеся компактностью конструкции и высоким уровнем автоматизации управления. Это позволяет снизить потребление тепловой энергии более, чем на 20% по сравнению с системами, подключенными к центральному тепловому пунктам.

В работах [5-8] отмечена важность применения систем автоматики в управлении оборудованием индивидуальных тепловых пунктов. Показано, что системы автоматизации потребления тепловой энергии позволяют снизить ее расход в течение всего отопительного периода. При этом эффективность функционирования индивидуальных тепловых пунктов может снизиться при неудовлетворительном состоянии внутренних систем отопления и их регулировке.

В работе [9] представлен анализ экономических аспектов эффективности функционирования систем теплоснабжения. Результаты исследования преимуществ индивидуальных тепловых пунктов, оснащенных отечественным оборудованием, представлены в [10]. Показано, что во многих городах страны применяют индивидуальные тепловые пункты блочного типа на базе импортных пластинчатых теплообменников. Отмечено также, что в настоящее время оборудование и автоматика индивидуальных тепловых пунктов отечественного производства значительно эффективнее зарубежных аналогов, так как в их конструкциях учтены особенности принципиально новых технологий их изготовления.

Надежность, ремонтпригодность имеют важное значение для обеспечения работы оборудования [11]. Для исследования показателей надежности использован метод, основанный на анализе дерева неисправностей. Такой анализ позволяет выявить наименее работоспособные элементы и оказывать влияние на их безопасную эксплуатацию. Исследованиями [12] выявлено, что за счет выявления и своевременного устранения отказов возможно получить снижение эксплуатационных затрат на 30%.

Оценку показателей надежности теплообменного оборудования целесообразно производить как в общем виде, так и поэлементно [13]. Это позволяет более широко охватить статистическую информацию о системе. Анализ статистических данных о системе в целом и об ее подсистемах позволяет полнее учитывать имеющиеся резервы надежности энергетического оборудования [14]. Применение теории надежности к оценке технического состояния отопительного оборудования [15] включает определение вероятностей для «средней продолжительности восстановления», «среднего времени между отказами» и «времени принятия решения». Это является очень важным элементом системы эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

Анализ публикаций показывает, что отечественные специалисты исследуют индивидуальные тепловые пункты в аспекте теплоэнергетической эффективности их функционирования. Однако, проблема надежности оборудования индивидуальных тепловых пунктов осталась за пределами интересов исследователей.

Зарубежные специалисты в своих исследованиях эффективности теплоэнергетического оборудования проблеме его надежности уделяют значительное внимание. Оценка эксплуатационной надежности оборудования индивидуальных тепловых пунктов позволяет не только оптимально использовать трудовые ресурсы и парк запасных частей, но и совершенствовать устройства и технологию их эксплуатации.

Методика исследования

К исследованию принят индивидуальный тепловой пункт здания Российского университета дружбы народов. Тепловая схема предусматривает использование тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения, а также для теплоснабжения установок приточной вентиляции. В схеме индивидуального теплового пункта предусмотрены: контур отопления с возможностью автоматического регулирования подачи теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха; контур горячего водоснабжения с возможностью автоматического поддержания постоянной температуры воды. Система отопления работает по зависимой схеме с пластинчатым теплообменником. Система горячего водоснабжения работает по закрытой схеме с пластинчатым теплообменником. Теплоснабжение приточной вентиляции осуществляется по независимой схеме с автоматическим регулированием в зависимости от температуры наружного воздуха.

Неисправности элементов оборудования индивидуального теплового пункта неравноценны как в качественном, так и в количественном аспектах. Для анализа надежности индивидуального пункта использован метод «дерева неисправностей», который позволяет осуществлять количественную оценку показателей надежности. Схема дерева повреждений представлена на рис. 1.

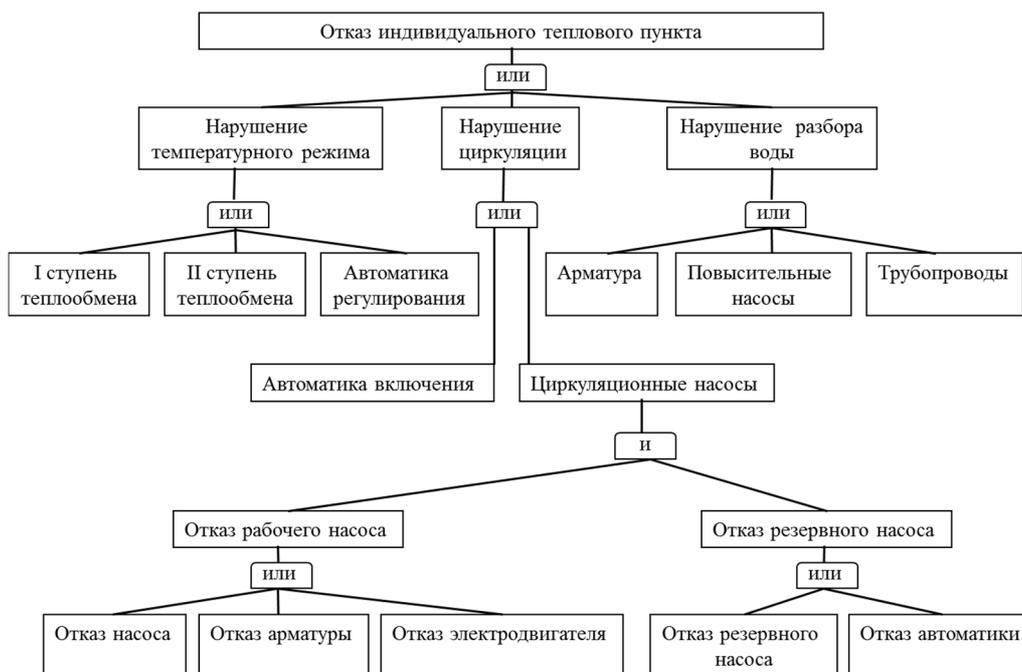


Рис. 1. «Дерево неисправностей» индивидуального теплового пункта

Анализ «дерева неисправностей» и оценок показателей надежности индивидуального теплового пункта выполнены на основе первичной статистической информации, которая получена из журналов регистрации технического состояния оборудования. При анализе записей использованы данные за четырехлетний период эксплуатации оборудования индивидуального теплового пункта.

После идентификации неисправностей оборудования выполнена предварительная статистическая обработка данных, заключающаяся в вычислении средних значений, стандартных отклонений и доверительных интервалов при обеспеченности $\gamma=0,05$.

Оборудование индивидуальных тепловых пунктов является восстанавливаемым. Количественным показателем надежности является вероятность безот-

казной работы $P(t)$ от начала до отказа. Поток отказов элементов оборудования является ординарным, поскольку следующий отказ может произойти только после восстановления.

В связи с этим основные показатели надежности оборудования индивидуального теплового пункта определяются на основе следующих положений:

$$\begin{cases} \lambda(t) = \lambda = const; \\ P(t) = e^{-\lambda t}; \\ Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \\ P(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}; \\ \omega(t) = \lambda; \\ t_{н.о.} = t_o \end{cases} \quad (1)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов оборудования; $Q(t)$ – вероятность отказа оборудования; $\omega(t)$ – средняя частота отказов; $t_{н.о.}$, t_o – время наработки на отказ и время работы до первого отказа после восстановления, соответственно.

Для оборудования индивидуальных тепловых пунктов характерно экспоненциальное распределение наработки на отказ. Применительно к анализируемым условиям план исследования имеет вид:

$$h_0 + \varphi t < \sum_{i=1}^k x_i < h_1 + \varphi t \quad (2)$$

Верхняя граница параметра отказов h_0 при $\sum x_i = 0$ определяется по формуле:

$$h_1 = \frac{\ln \frac{1 - \beta}{\alpha}}{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \quad (3)$$

Нижняя граница параметра отказов h_0 при $\sum x_i = 0$ определяется по формуле:

$$h_0 = \frac{\ln \frac{\beta}{1 - \alpha}}{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \quad (4)$$

Параметр браковки и приемки φ определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{n(\lambda_1 - \lambda_0)}{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \quad (5)$$

В представленных формулах использованы следующие обозначения: h_0 , h_1 – нижняя и верхняя границы параметра отказов оборудования, соответственно; t – продолжительность работы оборудования до отказа; β – вероятность того, что оборудование не отвечает требованиям технических условий эксплуатации, $\beta=0,05$; α – вероятность того, что оборудование будет забраковано несмотря на то, что показатели надежности соответствуют требованиям технических условий эксплуатации, $\alpha = 0,05$; λ_0 , λ_1 – приемочный и бракованный уровни интенсивности отказов, соответственно; n – объем выборки. Использование представленной методики для анализа фактического состояния элементов оборудования в процессе эксплуатации в индивидуальном тепловом пункте позволило выполнить оценку его надежности с обеспеченностью не ниже $\gamma = 0,05$.

Результаты исследования

Особенность эксплуатации ИТП заключается в проведении ежегодных профилактических работ в летний период при подготовке к зиме. Работы за-

ключаются не только в проверке герметичности системы отопления, но и в профилактическом ремонте арматуры, уплотнений теплообменников, насосных агрегатов. Несмотря на это, в процессе текущей работы оборудования в отопительный период возникают различные неисправности с некоторой повторяемостью.

Оценка надежности ИТП, как сложной системы, выполнена по блокам, конструктивно организованным в единое целое. Такой подход позволяет сравнивать узлы агрегатов по их надежности для возможности совершенствования их эксплуатации.

При анализе статистических данных об отказах отдельных элементов системы индивидуального теплового пункта установлено, что за четыре года наблюдений отказы теплообменников не зафиксированы. Установлено, что в процессе эксплуатации герметичность соединений теплообменников с фитингами незначительно ослабевает. После выполнения профилактических мероприятий герметичность указанных уплотнений восстанавливается и оборудование готово к работе. При этом указанное ослабление не является неисправностью и не приводит к отказу теплообменника.

Оценка надежности ИТП выполнена на основе анализа статистических данных насосного оборудования систем отопления и горячего водоснабжения. Отказ блоков насосного оборудования систем отопления и горячего водоснабжения произойдет, если в нерабочем состоянии будут рабочие и резервные насосные агрегаты, а также арматура, установленная на них. За период эксплуатации с 2004 г. и период целенаправленных наблюдений с 2012 г. были выявлены неисправности задвижек и обратных клапанов. Отказов насосов и электродвигателей к ним за указанный период не выявлено.

Интенсивность отказов насосного оборудования, обеспечивающего циркуляцию теплоносителя в системе отопления (от.) составляет от $\lambda_{от.min}^* = 0,043 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$ до $\lambda_{от.max}^* = 0,059 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$ при среднем значении $\lambda_{от.ср.}^* = 0,051 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$. Вероятность безотказной работы агрегатов насосного оборудования системы отопления в течение отопительного периода (5000 ч) составляет от $P_{от.min}^* = 0,971$ до $P_{от.max}^* = 0,979$ при среднем $P_{от.ср.}^* = 0,975$.

Интенсивность отказов насосных агрегатов системы горячего водоснабжения (гвс) составляет от $\lambda_{гвс.min}^* = 0,031 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$ до $\lambda_{гвс.max}^* = 0,04 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$ при среднем значении $\lambda_{гвс.ср.}^* = 0,036 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$. Вероятность безотказной работы в течение отопительного периода (5000 ч) составляет от $P_{гвс.min}^* = 0,981$ до $P_{гвс.max}^* = 0,985$ при среднем $P_{гвс.ср.}^* = 0,982$.

Интенсивность отказов ИТП в целом за отопительный период (5000 ч) составляет от $\lambda_{ИТП.min}^* = 0,074 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$ до $\lambda_{ИТП.max}^* = 0,099 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$ при среднем значении $\lambda_{ИТП.ср.}^* = 0,087 \cdot 10^{-4}, ч^{-1}$. Вероятность безотказной работы ИТП в целом составляет от $P_{ИТП.min}^* = 0,957$ до $P_{ИТП.max}^* = 0,964$ при среднем значении $P_{ИТП.ср.}^* = 0,952$.

По полученному среднему значению отказов ИТП в целом в годовом исчислении продолжительность межремонтного периода составляет $t_p = 11,5$ лет. Таким образом, установленное оборудование ИТП здания Российского университета дружбы народов характеризуется высокой надежностью и продолжительным межремонтным периодом при существующей системе эксплуатации.

Заключение

В результате четырехлетних систематических наблюдений за техническим состоянием индивидуального теплового пункта учебного корпуса Российского университета дружбы народов установлено:

1. Техническое обслуживание оборудования в период подготовки к зиме и качественная его эксплуатация позволяют обеспечить безотказное функционирование индивидуального теплового пункта в отопительный период.
2. Введенное в эксплуатацию в 2004 г. оборудование характеризуется высокой эксплуатационной надежностью.
3. За период с 2004 г. по 2016 г. отказы теплообменников не выявлены.
4. За период регулярных наблюдений с 2012 г. по 2016 г. отказы насосов и электродвигателей к ним не выявлены.
5. За период регулярных наблюдений выявлены отказы задвижек и обратных клапанов, а также ослабление герметичности соединения теплообменников с фурнитурой.
6. Для дальнейшего обеспечения бесперебойной работы индивидуального теплового пункта необходимо наладить документальный учет возникновения и устранения неисправностей оборудования. Это позволит создать условия для повышения надежности функционирования индивидуального теплового пункта.

Л и т е р а т у р а

1. *Бобух А.А., Ковалев Д.А.* Повышение энергосбережения закрытого централизованного теплоснабжения города при реконструкции центрального и модернизации индивидуального тепловых пунктов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 3 (121). С. 12-18.
2. *Курочкина К.Ю., Горшков А.С.* Влияние авторегулирования на параметры энергопотребления жилых зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 220-231.
3. *Манзарханова Л.М.* Анализ распределения потерь эксергии в тепловом пункте на примере общественного здания // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья: сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции (заочной). 2015. С. 137-140.
4. *Блочные индивидуальные тепловые пункты // Сантехника, отопление, кондиционирование.* 2011. № 11 (119). С. 58-61.
5. *Кунгс Я.А., Цугленок Н.В., Животов О.Н., Таран Е.Ю.* Индивидуальный тепловой пункт (концептуальный проект) // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 11. С. 196-199.
6. *Задвинская Т.О., Горшков А.С.* Методика повышения энергоэффективности типового многоквартирного дома путем внедрения систем учета, автоматизации и регулирования тепловой энергии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 8 (23). С. 79-92.
7. *Сафонов Е.В., Разнополов К.О., Бондарев Ю.Л.* Повышение эффективности использования энергетических ресурсов в системах теплоснабжения зданий за счет выбора стратегии управления тепловыми пунктами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 18. С. 146-149.
8. *Сафиуллин Д.Х., Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р.* Энергоэффективность индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Переход от ЦТП к ИТП // Сб. трудов Международной научно-техн. конференции им. Леонардо да Винчи. 2013. Т. 1. С. 183-185.
9. *Чернов С.С., Кулак Е.Ф.* Энергосбережение и повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения // Сибирский экономический вестник. 2016. № 3. С. 117-145.
10. *Сердюк А.А.* Исследование ряда преимуществ отечественных индивидуальных тепловых пунктов, применяемых в жилищно-коммунальном хозяйстве // Ученые заметки ТОГУ. 2012. Т. 3. № 1. С. 93-97.
11. *Peruzzi L., Salata F., A. de Lieto Vollaro, R. de Lieto Vollaro.* The reliability of technological systems with high energy efficiency in residential buildings // Energy and Buildings, Volume 68, Part A, January 2014, Pages 19-24.
12. *Sikos L., Klemeš Ji.* Reliability, availability and maintenance optimisation of heat exchanger networks // Applied Thermal Engineering, V. 30, Is. 1, January 2010, Pages 63-69.
13. *Babiarz B.* An introduction to the assessment of reliability of the heat supply systems // Intern. Journal of Pressure Vessels and Piping, V. 83, Is. 4, April 2006, Pages 230-235.

14. *Jiang-Jiang Wang, Chao Fu, Kun Yang, Xu-Tao Zhang, Guo-hua Shi, John Zhai.* Reliability and availability analysis of redundant BCHP (building cooling, heating and power) system // *Energy*, Volume 61, 1 November 2013, Pages 531-540.

15. *Myrefelt S.* The reliability and availability of heating, ventilation and air conditioning systems // *Energy and Buildings*, V. 36, Issue 10, October 2004, Pages 1035-1048.

References

1. *Bobuh A.A., Kovalev D.A.* Povyshenie jenergosberezhenija zakrytogo centralizovannogo teplosnabzhenija goroda pri rekonstrukcii central'nogo i modernizacii in-dividual'nogo teplovyh punktov // *Jenergosberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit.* 2014. № 3 (121). S. 12-18.

2. *Kurochkina K.Ju., Gorshkov A.S.* Vlijanie avtoregulirovaniya na parametry jenerGOPotrebleniya zhilyh zdaniy // *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij.* 2015. № 4 (31). S. 220-231.

3. *Manzarhanova L.M.* Analiz raspredeleniya poter' jeksergii v teplovom punkte na primere obshhestvennogo zdaniya // *Gradostroitel'stvo, rekonstrukcija i inzhenernoe obespechenie ustojchivogo razvitiya gorodov Povolzh'ja: sbornik trudov IV Vserossij-skoj nauchno-prakticheskoy konferencii (za-chnoj).* 2015. S. 137-140.

4. *Blochnye individual'nye teplovyje punkty* // *Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie.* 2011. № 11 (119). S. 58-61.

5. *Kungs Ja.A., Cuglenok N.V., Zhivotov O.N., Taran E.Ju.* Individual'nyj teplovoj punkt (konceptual'nyj proekt) // *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2014. № 11. S. 196-199.

6. *Zadvinskaja T.O., Gorshkov A.S.* Metodika povysheniya jenergojeffektivnosti tipovogo mnogokvartirnogo doma putem vnedreniya sistem ucheta, avtomatizacii i regulirovaniya teplovoj jenerгии // *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij.* 2014. № 8 (23). S. 79-92.

7. *Safonov E.V., Raznopolov K.O., Bondarev Ju.L.* Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovaniya jenergeticheskikh resursov v sistemah teplosnabzheniya zdaniy za schet vy-bora strategii upravleniya teplovyimi punktami // *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika.* 2012. № 18. S. 146-149.

8. *Safullin D.H., Ahmetova I.G., Muhametova L.R.* Jenergojeffektivnost' individual'nyh teplovyh punktov (ITP). Perehod ot CTP k ITP // *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii im. Leonardo da Vinchi.* 2013. T. 1. S. 183-185.

9. *Chernov S.S., Kulak E.F.* Jenergosberezhenie i povyshenie jenergojeffektivnosti v sistemah teplosnabzheniya // *Sibirskij jekonomicheskij vestnik.* 2016. № 3. S. 117-145.

10. *Serdjuk A.A.* Issledovanie rjada preimushhestv otechestvennyh individual'nyh teplovyh punktov, primenjaemyh v zhilishhno-kommunal'nom hozjajstve // *Uchenye zametki TOGU.* 2012. T. 3. № 1. S. 93-97.

11. *Peruzzi L., Salata F., A. de Lieto Vollaro, R. de Lieto Vollaro.* The reliability of technological systems with high energy efficiency in residential buildings // *Energy and Buildings*, Volume 68, Part A, January 2014, Pages 19-24.

12. *Sikos L., Klemeš Ji.* Reliability, availability and maintenance optimisation of heat exchanger networks // *Applied Thermal Engineering*, V. 30, Is. 1, January 2010, Pages 63-69.

13. *Babiarz B.* An introduction to the assessment of reliability of the heat supply systems // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, V. 83, Is. 4, April 2006, Pages 230-235.

14. *Jiang-Jiang Wang, Chao Fu, Kun Yang, Xu-Tao Zhang, Guo-hua Shi, John Zhai.* Reliability and availability analysis of redundant BCHP (building cooling, heating and power) system // *Energy*, Volume 61, 1 November 2013, Pages 531-540.

15. *Myrefelt S.* The reliability and availability of heating, ventilation and air conditioning systems // *Energy and Buildings*, V. 36, Issue 10, October 2004, Pages 1035-1048.

THE RELIABILITY AND AVAILABILITY OF HEATING OF THE BUILDING OF CAMPUS OF RUDN UNIVERSITY

A.P. SVINTSOV, T.V. SCRIPNIC, M.T. GUSAMOV, T.K. KRIVOSHAPKINA
RUDN University, Moscow, Russia

The article contains the results of the analysis of the reliability of the heating system of the building RUDN University. Malfunction of heat exchangers and pumps is not revealed for twelve years. During operation the malfunction of valves and check valves occurred. Troubleshooting timely of the malfunction ensures the stable functioning of heater with probability working without failure 0,952.

Key words: heat exchanger, gate valve, check valve, reliability, failure rate, fault.

ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТВОРОВ ПЛОТИН ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ ДЕМАРКАЦИИ МАНАБИ

КАМПОС СЕДЕНЬО АНТОНИО ФЕРМИН (Эквадор)¹,

Е.К. СЕНИЧЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент

И.И. ГРИЦУК^{2,1}, канд. техн. наук

¹Российский университет дружбы народов

Ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

²Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

В 1990 году, согласно с Интегральным планом развития водных ресурсов демаркации Манаби - ПИМА (РНИМА), для обводнения территории в области орошения и водоснабжения, были идентифицированы 7 проектов комплексного назначения. Для каждого из них, в первом приближении, предложен соответствующий створ для расположения плотины и определены предварительные размеры главных гидротехнических сооружений. С того времени прошло 26 лет и предложенные створы и топографическая и гидрометеорологическая информация для проектирования водохранилищ, с учетом времени, могли бы повлиять на точность конечных результатов.

На основе актуальных гидрометеорологических и топографических данных, предложена схема развития водных ресурсов для гидрографической демаркации Манаби, Эквадор. В статье даются преимущества нового расположения створов плотин Аямпе, Санкан, Каё, Хама и Коаке, что приведет к значительному уменьшению социальных и экологических последствий, а также размеров гидротехнических сооружений со снижением материальных и трудовых затрат при строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полезный объем, мёртвый объем, возвышение гребня плотины, испарение водохранилищ, экологический расход

Введение

Согласно РНИМА в 1990г. [10], для развития водных ресурсов гидрографической демаркации Манаби, было предложено проектирование 7 водохранилищ (Рис. 1): 2 – для южной зоны: Санкан и Аямпе; 3 – для центральной зоны: Ла Эсперанса, Поса Онда, Рио Гранде; 2 – для северной зоны: Коаке и Хама.

Координаты предложенных створов плотин приведены в Таблица 1.

Таблица 1. Координаты створов плотин предложенных в РНИМА в 1990г. (Источник: РНИМА 1990)

ПЛОТИНА	КООРДИНАТЫ UTM WGS84 (17S)	
	Е	N
Аямпе	536500	9814514
Санкан	539655	9867013
Поса Онда	589000	9877253
Ла Эсперанса	603265	9902183
Рио Гранде	613930	9922800
Хама	587504	9969073
Коаке	610662	9997556
Дауле Перипа	637282	9895207

Нужно отметить, что для проведения делимитации водосборных бассейнов и выбора мест створов плотин были использованы карты с изолиниями отметок интервалом 50 м [1- 3]. Расчёт площадей и периметров бассейнов сделан с помощью планиметра. Во многих случаях реальные площади водосборов оказались больше по сравнению с площадями, измеренными по картам.

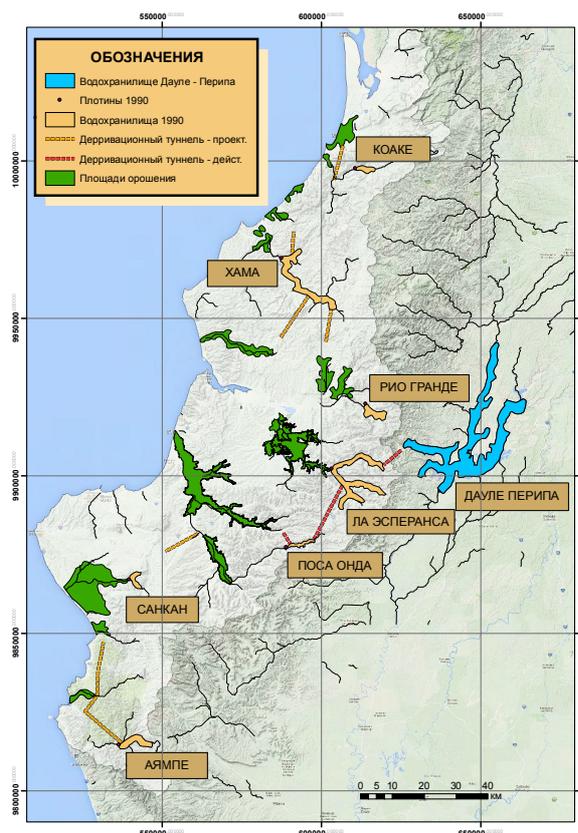


Рис. 1. Схема проектов РНІМА в 1990г. (Источник: РНІМА 1990)

На основе расчётов потребностей водных ресурсов для водоснабжения и орошения, в 1989 году была собрана гидрологическая, топографическая и гидрогеологическая информации, по которым приближённо определены места расположения створов (Таблица 1) для проектирования плотин [4-6], а также характерные отметки с соответствующими параметрами водохранилищ.

Из перечисленных проектов, в настоящее время действует проект Чоне–Портовдьехо в центральной зоне Демаркации Манаби, состоящий из следующих элементов:

1. водохранилище Дауле–Перипа (6000 млн. м³);
2. деривационный туннель ($Q = 18 \text{ м}^3/\text{с}$);
3. водохранилище Ла Эсперанса (450 млн. м³);
4. плотина из местных материалов Ла Эсперанса ($H = 47 \text{ м}$);
5. оросительная система Каррисаль–Чоне (14250 га);
6. насосная станция Северино ($Q = 16 \text{ м}^3/\text{с}$);
7. деривационный туннель ($Q = 16 \text{ м}^3/\text{с}$);
8. водохранилище Поса Онда (450 млн. м³);
9. плотина из местных материалов Поса Онда ($H = 40 \text{ м}$);
10. оросительная система Поса Онда (15000 га);
11. деривационный туннель ($Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$).

Проект Рио Гранде находится на этапе строительства.

На основе многолетних гидрологических данных (1963-2013гг), с учётом роста населения и использованием географических информационных систем (GIS), скорректированы створы намеченных плотин и их характеристики. Предложен новый створ в южной зоне демаркации.

Основы расчётов

В экваториальных районах климат обуславливается существованием двух сезонов: засушливым и муссонным, каждый из которых длится примерно 6 месяцев.

В южной Америке экваториальный район пересечён кордильером Анд, являющимся основным источником ледникового питания рек, особенно в засушливый период. Реки демаркации Манаби имеют только муссонное питание.

Исходная информация для расчёта водохранилищ, следующая [12]:

- расчетный объём воды для удовлетворения потребностей на орошение, водоснабжение и гидроэнергетику (при необходимости);
- многолетние метеорологические данные гидрометеорологических станций зоны проекта;
- ряды среднемесячных расходов гидрометрических станций рек;
- картография зоны проекта.

Последовательность для определения параметров водохранилища следующая [8, 9, 13-15]:

- a) *выбор створа* в топографическом сужающемся русле, отдалённом от населённых пунктов и магистральных дорог;
- b) *построение батиграфических и объемных характеристик водохранилища*;
- c) *определение полезного объёма водохранилища* путем суммирования объёмов потребностей воды, потерь на испарение, на фильтрацию и экологического (санитарного):

$$V_u = V_s + V_{ev} + V_f + V_{ec}, \quad (1)$$

где V_u – полезный объём, V_s – объём бытовых потребностей, V_{ev} – объём на испарение, V_f – объём на фильтрацию, V_{ec} – экологический объём;

- d) *определение мёртвого объёма водохранилища* – при отсутствии данных заиливания водохранилища используют рекомендации Э. Матерона [13], по которым мёртвый объём принимается равным 10% от объёма потребностей:

$$V_m = 0.1V_s; \quad (2)$$

- e) *полный объём водохранилища* – сумма полезного и мёртвого объёмов:

$$V_d = V_u + V_m; \quad (3)$$

- f) *определение отметок водохранилища, соответствующих полезному и мёртвому объёмам* H_u и H_m по кривой объёмов водохранилища;

- g) *определение отметки гребня плотины* h_s (Рис. 2);

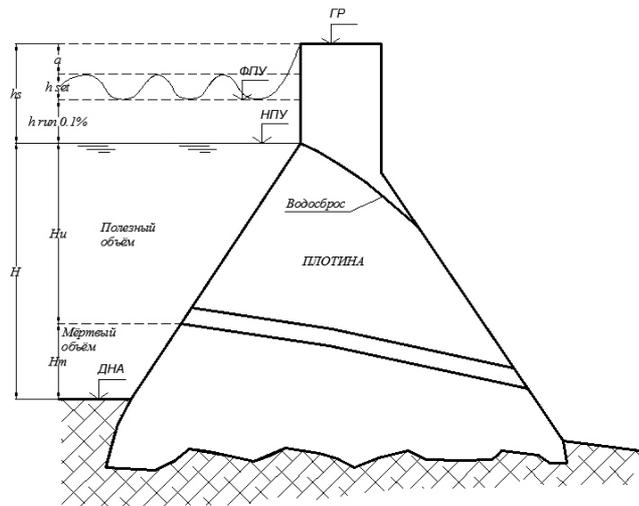


Рис. 2. Определение отметок плотины

$h_s = h_{run} + h_{set} + a$, где h_{run} – высота наката ветровых волн обеспеченностью 0.1%, м; h_{set} – ветровой нагон воды в верхнем бьефе, м; a – запас возвышения гребня плотины, м.

h) *определение высоты плотины H:*

$$H = H_m + H_u + h_s. \quad (4)$$

Отметка гребня плотины определяется:

$$\nabla_{ГР} = \nabla_{ДНА} + H, \quad (5)$$

где $\nabla_{ГР}$ – отметка гребня, м; $\nabla_{ДНА}$ – отметка дна, м; H – высота плотины, м.

Предложенная схема проектов оптимизации водных ресурсов

Применяя изложенную методику расчётов для оптимизации использования водных ресурсов гидрографической демаркации Манаби (Эквадор), рассчитаны 5 водохранилищ, общие данные которых приведены в Таблица 2. На Рис. 3 показана общая схема запроектированных плотин [7].

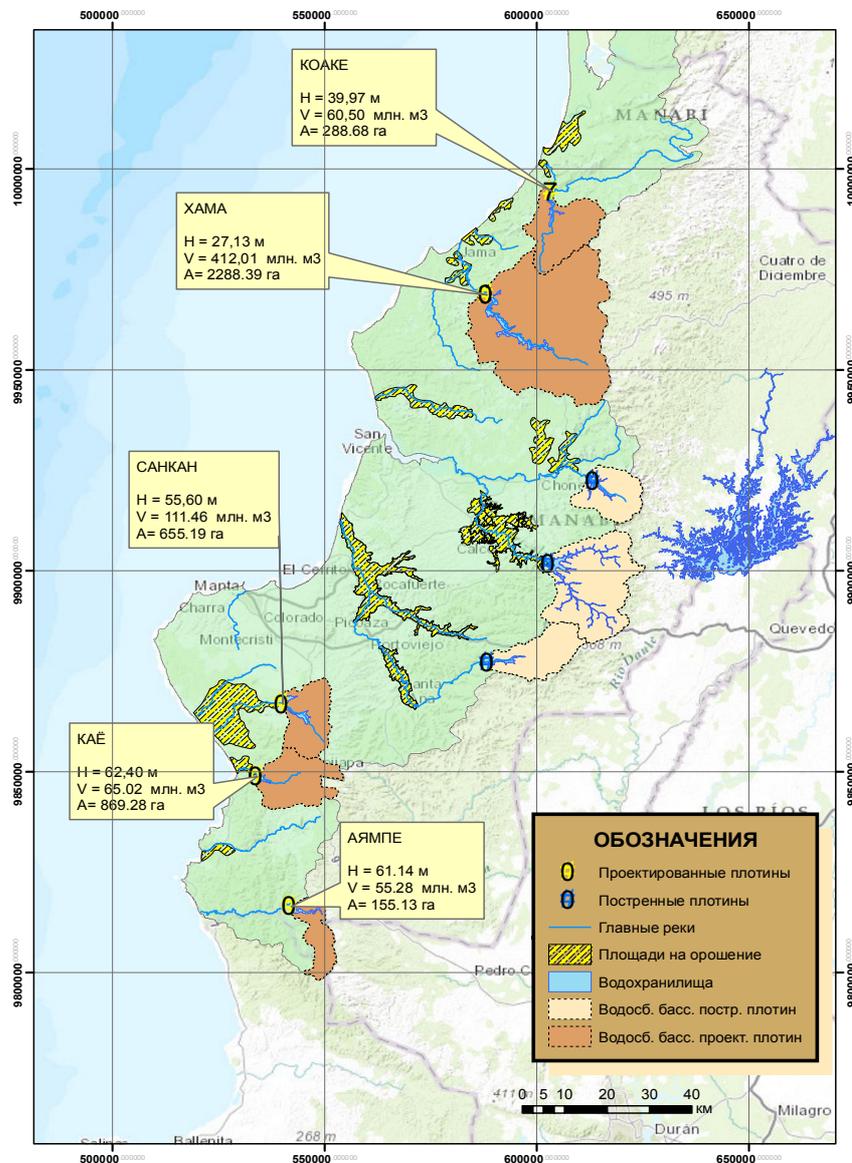


Рис. 3. Схемы запроектированных плотин в гидрографической демаркации Манаби, Эквадор, для оптимизации использования водных ресурсов

Таблица 2. Общие данные запроектированных водохранилищ

Плотина	Координаты створа (UTM WGS84 17S)			Отметки			Высота (м)	Водохранилище	
	W	N	Код бассейна	дна (мнум)	НПУ (мнум)	гребня (мнум)		Объем (млн. м3)	Зеркало (га)
Аямпе	542139.47	9816547.76	15134	238.00	296.20	299.14	61.14	55.28	155.13
Санкан	540159.76	9866804.01	15137	180.00	230.41	235.60	55.60	111.46	655.19
Каё	534113.59	9848804.08	15138	90.00	147.50	152.40	62.40	65.02	869.28
Хама	588319.48	9968678.19	1518	120.00	141.48	147.13	27.13	412.01	2288.39
Коаке	603734.94	9994294.39	15192	60.00	94.37	99.97	39.97	60.50	288.68

Для плотин Аямпе, Санкан и Хама выбраны новые створы в более узких сечениях рек, что значительно снижает материальные затраты при их строительстве – длины плотин уменьшаются на 83.18, 35.16 и 38.43 %, соответственно. Сравнительные данные приведены в Таблица 3 и представлены на Рис. 4, Рис. 5 и Рис. 6.

Таблица 3. Общие данные створов плотин предложенных 1990 и 2015 гг.

Плотина	Данные ПИМА 1990			Предложение 2015			Уменьшения длины гребня (%)
	Координаты створа (WGS84 UTM 17S -M)		Длина гребня (м)	Координаты створа (WGS84 UTM 17S -M)		Длина гребня (м)	
	Е	N		Е	N		
Аямпе	536500	9814514	2,010.00	542139.47	9816547.76	338.00	83.18
Санкан	539655	9867013	1,001.00	540159.76	9866804.01	649.00	35.16
Хама	587504	9969073	255.00	588319.48	9968678.19	157.00	38.43

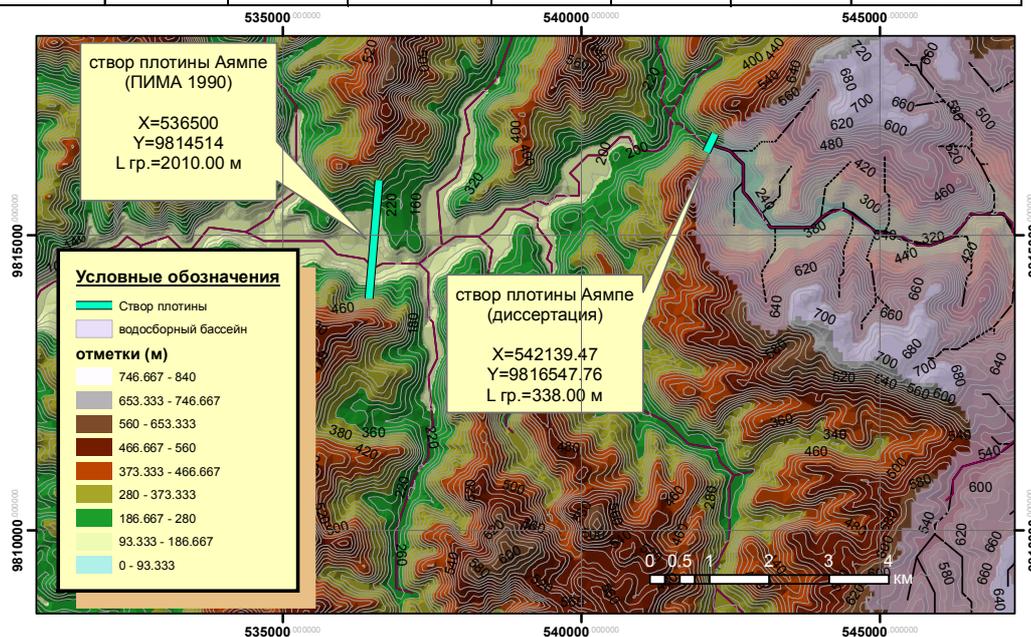


Рис. 4. Сопоставление предложенных створов плотины Аямпе

Створ плотины Коаке, длиной 300м, предложенный РИМА в 1990 году, в настоящее время, экономически невыгоден и представляет техногенную угрозу из-за возможного подтопления и затопления населенного пункта Атауальпа (Atahualpa) [11] (Рис. 7).

Новый створ находится на расстоянии 6.63 км вниз по течению от предложенного РИМА в 1990 году (Рис. 7), с длиной плотины 565.00 м.

Годовой объем водохранилища Санкан составляет 76.58 млн.м³, что не обеспечивает потребности на орошение и водоснабжение в объеме 111.46 млн.

м³. По рекомендациям РНМА в 1990 году, для предотвращения дефицита, была спроектирована насосная система от реки Портовъехо (районе «Эль Гуабито») до бассейна реки Санкан, с подачей 6.00 м³/с через магистральный водовод длиной 17.45 км.

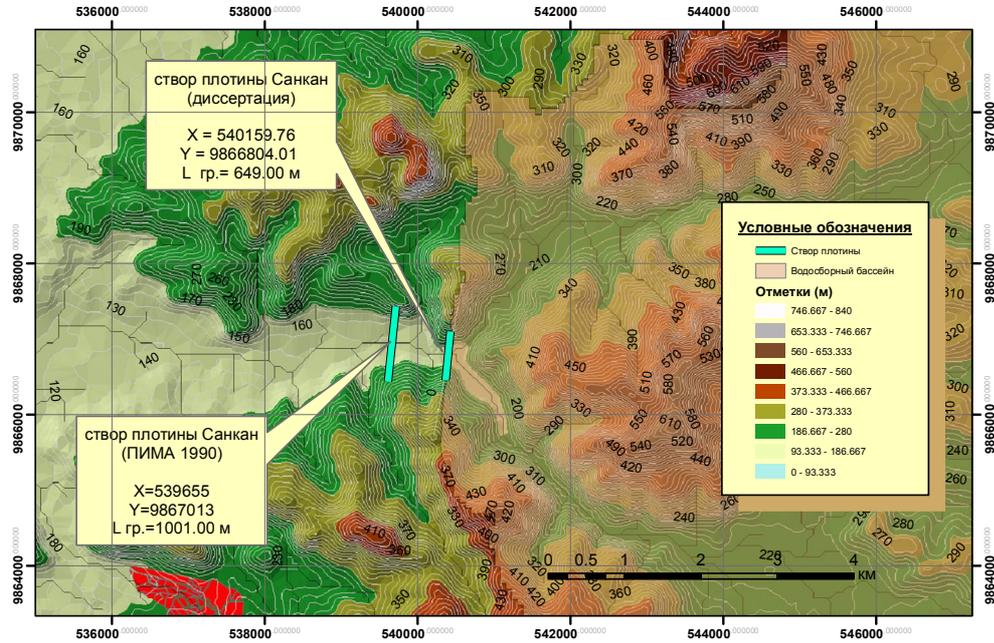


Рис. 5. Сопоставление предложенных створов плотины Санкан

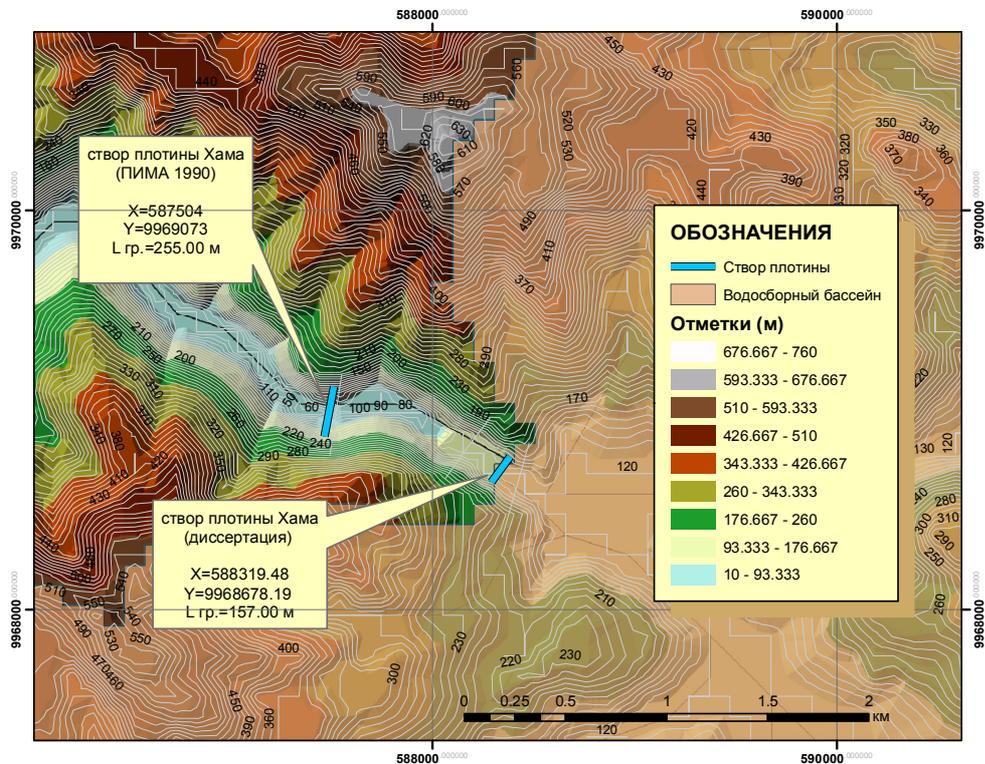


Рис. 6. Сопоставление предложенных створов плотины Хама

Исследования показали, что в современных условиях схема насосной системы, предложенная РНМА в 1990 году, морально устарела и не

соответствует потребностям водопотребления. На основании этого рекоменду-
рекомендуется проектирование новой плотины, расположенной на расстоянии
5.50 км, на юго-востоке города Пуэрто-Каё, с емкостью водохранилища 65.02
млн. м³ и длиной 496.00 м.

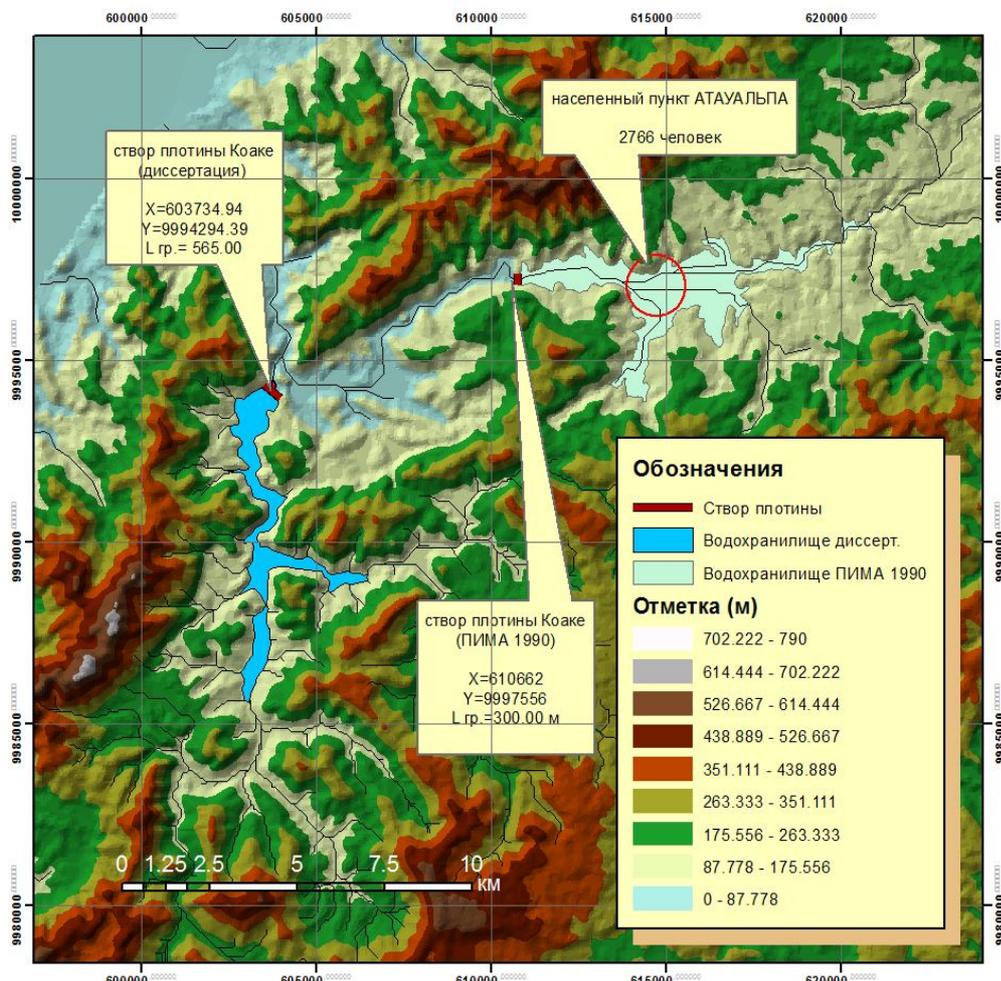


Рис. 7. Сопоставление предложенных створов плотины Коаке

Гидроузел Каё будет покрывать не только дефицит бассейна Санкан, но и обеспечит водой город Пуэрто-Каё, который имеет высокий потенциал туристического и экономического развития. Преимуществом является то, что водозабор из реки Портовьехо переносится в водохранилище плотины Аямпе, а длина магистральных труб уменьшается на 4.82 км (Рис. 8).

Выводы

Впервые, на основе многолетних гидрометеорологических и гидрологических данных, разработана схема перспективного развития гидротехнического строительства с целью оптимального использования водных ресурсов гидрографической демаркации Манаби и устранения внутригодового дефицита воды.

Предложены 5 новых створов для создания водохранилищ: 3 – в южной зоне, на реках Аямпе, Каё и Санкан; 2 – в северной зоне, на реках Хама и Коаке. Полный объем всех водохранилищ оценён в 704.27 млн. м³.

Внедрение предложенных рекомендаций значительно уменьшит социальные и экологические последствия, а также размеры гидротехнических

сооружений, что приведет к снижению материальных и трудовых затрат при строительстве.

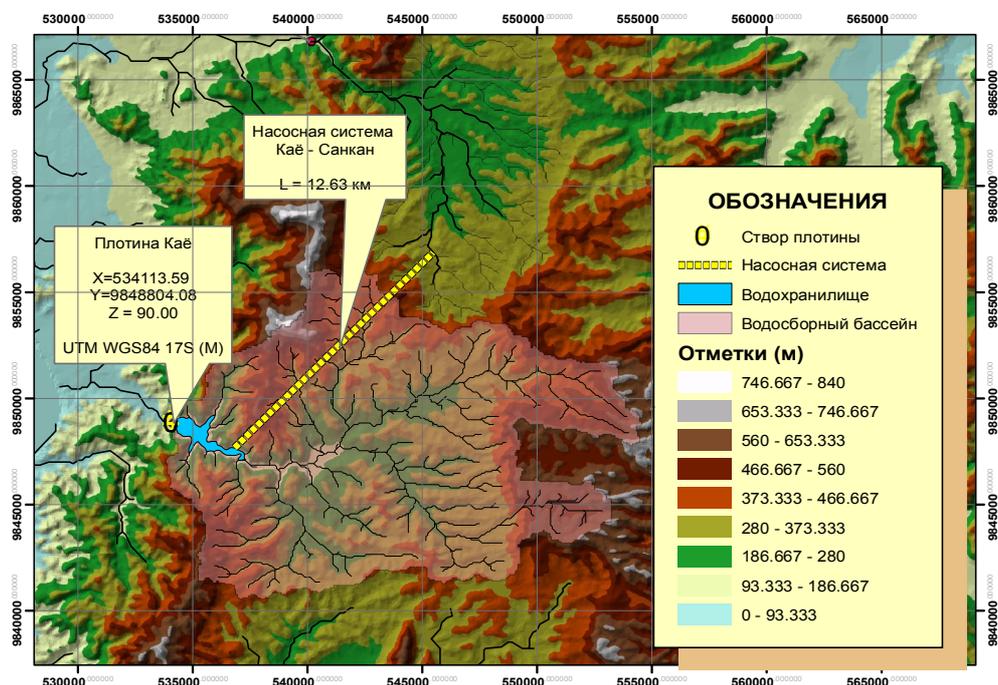


Рис. 8. Схема плотины Каё

Л и т е р а т у р а

- [1] Кампос Седеньо Антонио Фермин, Синиченко Е.К., Грицук И.И. Влияние термического режима Тихого океана на осадки в гидрографической демаркации Манаби, Эквадор // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - № 5, 2016, с. 71-74.
- [2] Кампос Седеньо А. Ф., Синиченко Е. К., Грицук И. И. Особенности водного режима рек провинции Манаби (Эквадор) // ВЕСТНИК № 4 – Российский университет дружбы народов. – 2014. – С. 41-46.
- [3] Кампос Седеньо А. Ф., Синиченко Е. К., Грицук И. И. Структурный подход к оценке морфометрических характеристик бассейнов рек провинции Манаби (Эквадор) // ВЕСТНИК № 1. – Российский университет дружбы народов. – 2015. – С. 52-61.
- [4] Кампос Седеньо А. Ф., Синиченко Е. К., Грицук И. И. Объёмы стока дождевых осадков районов гидрографической демаркации Манаби (Эквадор) // Труды VIII Межд. научно-практической конференции «Инженерные системы - 2015». – 2015. – С. 291-295.
- [5] Кампос Седеньо А.Ф., Синиченко Е.К., Грицук И.И. Анализ данных метеорологических станций провинции Манаби // ВЕСТНИК № 3 – Российский университет дружбы народов. – 2015. – С. 41-49.
- [6] Кампос Седеньо А. Ф., Синиченко Е. К., Грицук И. И. Математическая модель для определения среднегодовых осадков с использованием растров и других элементов ГИС // ВЕСТНИК № 3 – Российский университет дружбы народов. – 2015. – С. 32-40.
- [7] Кампос Седеньо А. Ф., Синиченко Е. К., Грицук И. И. Схема проектов для развития водных ресурсов гидрографической демаркации Манаби, Эквадор // ВЕСТНИК № 1 – Российский университет дружбы народов. – 2016. – С. 9-16.
- [8] Орлов В. Г. Основы Гидрологии Суши: Учебное Пособие // – Ленинград: Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), 1976. – 78с.
- [9] Синиченко Е. К., Грицук И. И., Шамреева А. А. Основы гидрологии - Вычисление максимальных расходов половодья и паводка на водотоках // – Москва: Российский университет дружбы народов, 2015. – 32с.
- [10] Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Manabí (PHIMA) / Centro de Rehabilitación de Manabí. □ Manabi - Ecuador, 1989.

- [11] *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Cómo crecerá la población del Ecuador? [Электронный ресурс] / Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. – 2015. – Режим доступа: http://www.inec.gob.ec/proyecciones_poblacionales/presentacion.pdf.
- [12] Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. Anuarios Meteorológicos [Электронный ресурс] / Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. – 2015. – Режим доступа: <http://186.42.174.231/index.php/clima/anuarios-meteorologicos>.
- [13] *Materón H.* Obras hidráulicas rurales // Hernán Materón. – Colombia: Universidad del Valle, 1991. – 234 с.
- [14] *Ministerio de Agricultura y Ganadería, IICA, CLIRSEN*. Sistemas de Información Geográfica para Aplicaciones Agropecuarias en el Ordenamiento de Territorio y Manejo Integral de Cuencas [Электронный ресурс] / Ministerio de Agricultura y Ganadería, IICA, CLIRSEN. – 2015. – Режим доступа: <http://www.uazuay.edu.ec/promsa/ecuador.htm>.
- [15] *Penman H. L.* Vegetation and Hydrology // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1963. – Т. 89, № 382. – С. 72.

References

- [1] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. Influence of thermal regime of the Pacific Ocean on the rainfall in the hydrographic demarcation of Manabi, Ecuador, Structural Mechanics of engineering structures and buildings, № 5, 2016, p. 71-74.
- [2] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. Features of the water mode of the rivers of the province Manabi (Ecuador), Vestnik RUDN, No. 4, 2014, p. 41-46.
- [3] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. Structural approach to an assessment of morphometric characteristics of basins of the rivers of the province Manabi (Ecuador), Vestnik RUDN, No. 1, 2015, p. 52-61.
- [4] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. Amounts of a drain of rain rainfall of areas of hydrographic demarcation of Manabi (Ecuador), Proc. of VIII International scientific and practical conference "Engineering Systems – 2015", 2015, p. 291-295.
- [5] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. The analysis of data of meteorological stations of the province Manabi, Vestnik RUDN, No. 3, 2015, p. 41-49.
- [6] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. Matematicheskaya model for determination of annual average rainfall with use of rasters and other GIS elements, Vestnik RUDN, No. 3, 2015, p. 32-40.
- [7] Campos Sedeño A. F., Sinichenko E. K., Gritsuk I. I. The scheme of projects for development of water resources of hydrographic demarcation of Manabi, Ecuador, Vestnik RUDN, No. 1, 2016, 9-16.
- [8] V. Geagles. Bases of the Hydrology of Sushi: The education guidance, Leningrad: Leningrad hydrometeorological institute (LGMI), 1976, 78p.
- [9] Sinichenko E. K., Gritsuk I. I., Shamreeva A. A. Hydrology bases - Calculation of the maximum expenses of a high water and a flood on waterways, Moscow: RUDN, 2015, 32p.
- [10] Plan Integral de Desarrollo de los Recursos Hídricos de la Provincia de Manabí (PHIMA)/Centro de Rehabilitación de Manabí. □ Manabi - Ecuador, 1989.
- [11] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Cómo crecerá la población del Ecuador? [Electronic resource] / Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. – 2015. – Access mode: http://www.inec.gob.ec/proyecciones_poblacionales/presentacion.pdf.
- [12] Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. Anuarios Meteorológicos [An electronic resource] / Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. – 2015. – Access mode: <http://186.42.174.231/index.php/clima/anuarios-meteorologicos>.
- [13] Materón, H. Obras hidráulicas rurales/Hernán Materón. – Colombia: Universidad del Valle, 1991. – 234 with.
- [14] Ministerio de Agricultura y Ganadería, IICA, CLIRSEN. Sistemas de Información Geográfica para Aplicaciones Agropecuarias en el Ordenamiento de Territorio y Manejo Integral de Cuencas [An electronic resource] / Ministerio de Agricultura y Ganadería, IICA, CLIRSEN. – 2015. – Access mode: <http://www.uazuay.edu.ec/promsa/ecuador.htm>.
- [15] Penman H. L. Vegetation and Hydrology, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1963, Vol. 89, No. 382, p. 72.

JUSTIFICATION OF CHANGE OF THE ARRANGEMENT OF ALIGNMENTS OF DAMS AT COMPLEX USE OF WATER RESOURCES OF HYDROGRAPHIC DEMARCATION OF THE MANABA

CAMPOS CEDENO ANTONIO FERMIN¹, E.K. SINICHENKO¹, I.I. GRITSUK^{2,1}
¹RUDN University, ²Water Problems Institute, Russian Academy of Science

In 1990, it agrees with the Integral development plan for water resources of Demarcation of Manabi - (PHIMA), for flood of the territory in the field of an irrigation and water supply, 7 projects of complex appointment were identified. For each of them, as a first approximation, the corresponding alignment for an arrangement of a dam is offered and the preliminary sizes of the main hydraulic engineering constructions are determined. Since then there passed 26 years and the offered alignments and topographical and hydrometeorological information for projection of reservoirs, taking into account time, could influence the accuracy of the end results. On the basis of actual hydrometeorological and topographical data, the scheme of development of water resources for hydrographic demarcation of Manabi, Ecuador is offered.

In the article, advantages of a new arrangement of alignments of dams are given to Ayampe, Sancan, Cayo, Jama and Coaque that will lead to the considerable decrease of social and ecological consequences, and also the sizes of hydraulic engineering constructions with decrease in the material and labor inputs at construction.

Key words: useful volume, dead volume, elevation of the dam crest, evaporation, environmental flow.



Расчеты на устойчивость

ДЕФОРМАЦИИ КРЕНА ВЫСОТНОГО ОБЪЕКТА НА ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПЛИТЕ

В.К. ИНОЗЕМЦЕВ, доктор технических наук, профессор

О.В. ИНОЗЕМЦЕВА, кандидат технических наук

С.А. ЖЕСТКОВА, аспирант

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, ул. Политехническая д.77; e-mail: zhestkovas@list.ru

Рассматривается задача устойчивости применительно к высотному объекту, взаимодействующему с деформируемым основанием. Исследование развития деформаций крена высотного объекта методом «прослеживания» состояний равновесия путем решения нелинейных уравнений общей устойчивости высотного объекта на деформируемой фундаментной плите.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: критическая нагрузка, устойчивость, высотный объект, деформируемое основание.

Рассмотрим высотный объект на деформируемой прямоугольной фундаментной плите (рис.1).

Изгибная жесткость фундаментной плиты оказывает влияние на устойчивость исходного строго вертикального положения равновесия высотного объекта и на развитие деформаций крена высотного объекта при приближении параметра нагрузки к критическому значению. Исследование развития деформаций крена высотного объекта возможно методом «прослеживания» состояний равновесия путем решения нелинейных уравнений общей устойчивости высотного объекта на деформируемой фундаментной

плите. Дифференциальные уравнения равновесия записываются в этом случае в приращениях:

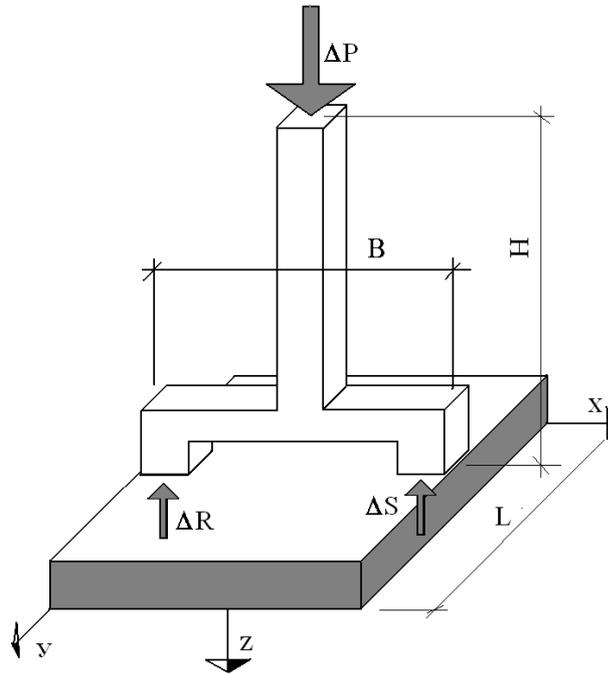


Рис. 1

$$D\nabla^4 \Delta W(x, y) + k\Delta W(x, y) = \begin{cases} 0 \\ \Delta q_R(\Delta W_S, \Delta W_R, W_S, W_R, P) \\ 0 \\ \Delta q_S(\Delta W_S, \Delta W_R, W_S, W_R, P) \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь D – цилиндрическая жесткость фундаментной плиты; $\Delta W(x, y)$ – приращение «осадок» основания под фундаментной плитой в возмущенном состоянии равновесия; W – суммарные функции «осадок», накопленные на предыдущих шагах нагружения; нагрузка на фундаментную плиту под левой (Δq_R) и правой (Δq_S) опорами высотного объекта; P – вес высотного объекта.

Приращение давления на фундаментную плиту под опорами высотного объекта и граничные условия для свободного края плиты ($x = 0$) имеют вид:

$$\Delta q_{\frac{R}{S}}(\Delta W_S, \Delta W_R, P) = \frac{\Delta P}{F} \left(\frac{1}{2} \mp \frac{H}{B^2} \sum_{i=1}^{n-1} (\Delta W_S - \Delta W_R) \right) \mp \frac{PH}{FB^2} (\Delta W_S - \Delta W_R)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta W}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \Delta W}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^3 \Delta W}{\partial x^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 \Delta W}{\partial x \partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Здесь $\Delta W_R, \Delta W_S$ – приращение осадок под правой и левой опорами высотного объекта; H – высота центра сил тяжести объекта; B – расстояние между опорами; F – площадь опор высотного объекта.

Для расчета деформаций крена высотного объекта дифференциальная задача общей устойчивости высотного объекта сводится к неоднородной алгебраической системе метод конечных разностей [1]. Алгебраическая задача, записанная в матричной форме, имеет вид:

$$\Omega \Delta U = P \Psi \Delta U + \Delta P \Phi U, \quad (3)$$

где ΔU – столбец неизвестных метода конечных разностей (приращения вертикальных перемещений), P - нагрузка, Ω , Ψ , Φ - матрицы коэффициентов алгебраической задачи.

Здесь очевидно, что при цилиндрической жесткости фундаментной плиты много большей чем жесткость грунтового основания на сжатие ($D \gg k$), результаты расчета критической нагрузки могут быть получены на основе аналитического решения [2]:

$$P_{kp} = \frac{k J_{oc}}{H}, \quad (4)$$

где: J_{oc} - наименьший центральный момент инерции площади основания, а k – коэффициент постели основания, характеризующий работу основания на обжатие, H – высота приложения центра вертикальных усилий. Существенным допущением здесь является то, что рассматриваемый объект считается абсолютно жестким.

Рассмотрим квадратную в плане фундаментную плиту (Рис. 1) с отношением размеров $H/L=10$. Расчет выполним для трех значений отношения цилиндрической жесткости плиты к коэффициенту Винклера D/k :

$$1 - D/k = 13888 \text{ м}^4; 2 - D/k = 217 \text{ м}^4; 3 - D/k = 13.9 \text{ м}^4.$$

Начальное несовершенство системы представляет собой начальный эксцентриситет центра сил тяжести системы $\varepsilon_0=0.01 \text{ м}$.

Результаты расчета приращений вертикальных перемещений опор высотного сооружения для различной изгибной жесткости фундаментной плиты показаны на рис. 2.

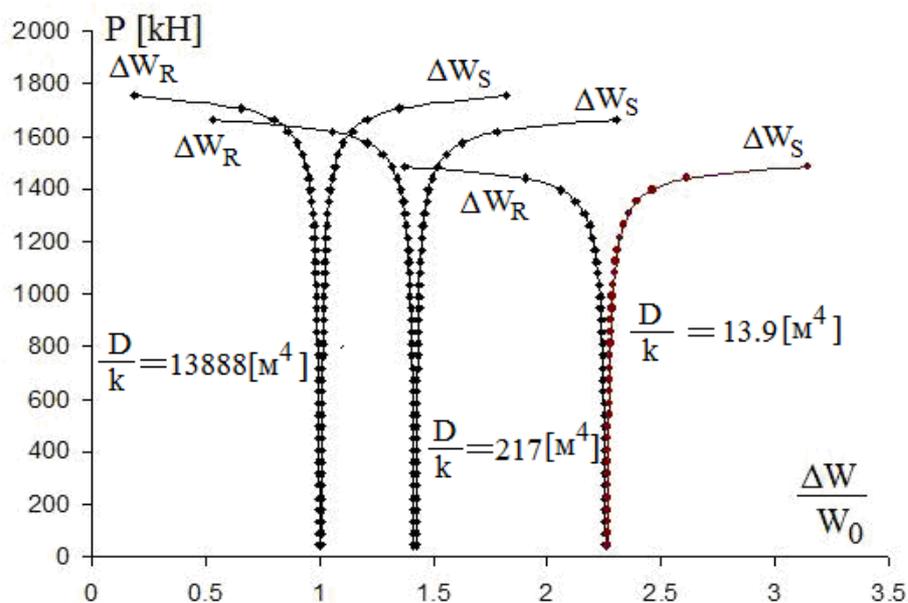


Рис. 2.

Снижение цилиндрической жесткости фундаментной плиты приводит к развитию деформаций крены высотного объекта (рис. 2.).

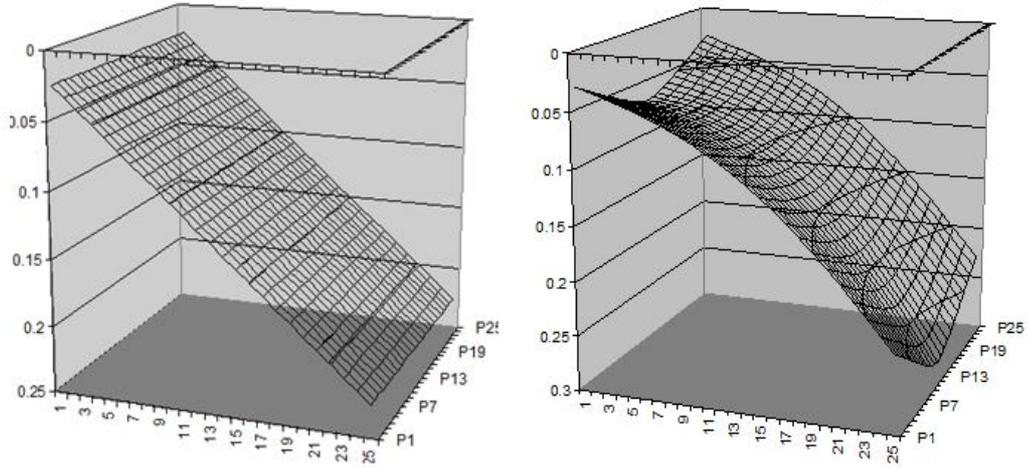


Рис. 3.

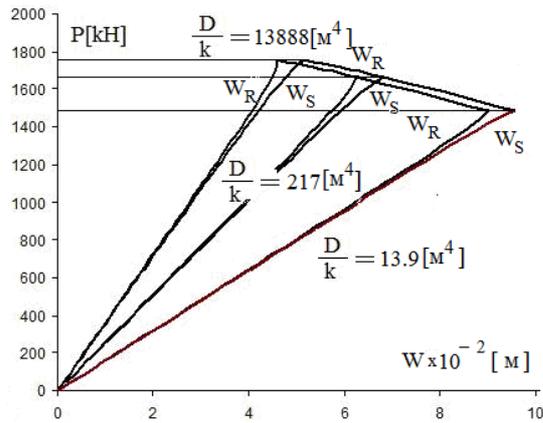


Рис. 4.

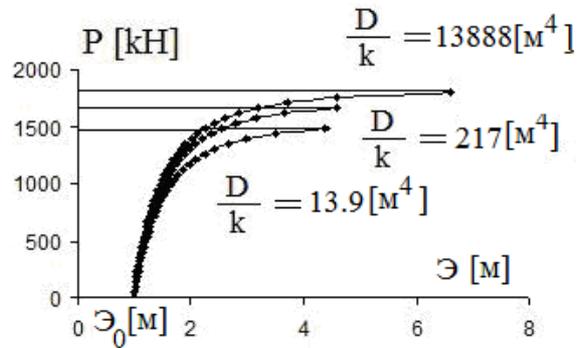


Рис. 5.

Развитие деформаций крена высотного объекта связано с неравномерностью осадок фундаментной плиты (рис. 3). Фундаментная плита с большой цилиндрической жесткостью испытывает деформации крена. При снижении цилиндрической жесткости фундаментная плита испытывает деформации крена с изгибом.

На рис. 4 показаны вертикальные перемещения опор высотного сооружения для различных значений цилиндрической жесткости фундаментной плиты.

На рис. 5 представлены результаты расчета, эксцентриситета центра сил тяжести высотного объекта для различной цилиндрической жесткости фундаментной плиты.

Л и т е р а т у р а

1. *Коллац Л.* Задачи на собственные значения. – М.: Наука, 1968. – 504 с.
2. *Алфинов Н.А.* Основы расчета на устойчивость упругих систем. - М.: Машиностроение. – 1978.
3. *Ржаницын А.Р.* Устойчивость равновесия упругих систем. – Москва: Гос. Изд. технико-теоретической литературы. – 1955.
4. *Энгель Х.* Несущие системы / Хайно Энгель; предисл. Ральфа Рапсона; пер. с нем. Л.А. Андреевой. – М.: АСТ: Астрель, 2007. – С. 344.: илл.
5. *Иноземцев В.К., Редков В.И.* Математическая модель деформирования геомассивов применительно к деформационным процессам в основаниях сооружений / В.К. Иноземцев, В.И. Редков. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 412 с.

References

1. *Kollatts, L.* (1968). *Zadachi na Sobstvennyye Znacheniya*. M.: Nauka, 504 p.
2. *Alfynov N.A.* (1978) *Osnovi Rascheta na Ustoichivost' Uprygih Sistem*. M.: Mashinostroenie.
3. *Rzhanitsyn, A.R.* (1955). *Ustoichivost' Ravnovesiya Uprygih Sistem*. Gos.Izd.Techniko-teoriticheskoi literatyri. Moskva.
4. *Engel', X.* (2007). *Nesyshie Sistemi*; predisl. Ralfa Rapsona; per. s nem. L.A. Andreevoi; M.: ST: Astrel, 344 p.
5. *Inozemtsev, V.K. Redkov, V.I.* (2005). *Matematicheskaya Model Deformirovaniya Geomassivov Primenitlno k Deformatsionnim Protzessam v Osnovaniyah Sooryzhenii*. Saratov, SSTU, 412 p.

LIST'S DEFORMATIONS OF HIGH-RISE BUILDING ON DEFORMABLE SLAB

V.K. Inozemtzev, O.V. Inozemtzeva, S.A. Zhestkova.
Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov

The objective of stability of high-rise building interacting with deformable foundation is discussed. Study of the development of tilt's deformation of high-rise building using method «tracking» states of equilibrium through solving non-linear equations overall sustainability of high-rise building on deformable foundation slab.

Key words: critical load, stability, high-rise building, deformation

Критика и рецензии

Г.А. Джинчвелашвили,

д.т.н., проф. кафедры «Сопротивление материалов» МГСУ, Москва

Референция нового учебного пособия по динамике сооружений профессора Анохина Н.Н.

Совсем недавно в издательстве «АСВ» вышла долгожданная книга замечательного педагога, профессора Анохина Н.Н. по динамике сооружений [1]. Эту книгу студенты ждали почти 16 лет. Совместно с учебником по строительной механике [2], пособия Н.Н. Анохина [1, 3] образуют единый блок литературы по строительной механике, специально приспособленный к требованиям МГСУ и других вузов, имеющих строительные специальности.

В первых двух частях [3] рассматриваются статически определимые и статически неопределимые стержневые системы на действие различных статических нагрузок. Третья часть [1] является специальным курсом строительной механики – динамика плоских стержневых систем. В нем рассмотрены квазистатический и энергетический метод определения частот собственных колебаний, как с учетом сил сопротивления, так и без их учета. Вынужденные колебания систем рассмотрены при действии различных динамических нагрузок: гармонической, внезапно приложенной силы постоянной величины, импульсивной, мгновенного импульса, ударной.

Применение этих методов показано на решении систем как с одной степенью свободы, так и систем с конечным и бесконечно большим числом степеней свободы.

Пособия вызывают большой интерес не только у студентов, для которых оно, собственно, и предназначено, но и у преподавателей строительной механики, поможет им в разработке зачетных и экзаменационных задач.

Особую ценность учебным пособиям придает также принятая методика изложения Материала, в соответствии с которым в начале каждого параграфа автор приводит теоретический материал, облегчающий освоение предмета. Затем приводятся с подробными решениями характерные типовые примеры по теме и достаточное количество задач для самостоятельного решения.

В число задач, рассмотренных автором, включены и такие, которые дают ответы на все вопросы расчетно-графических заданий по курсу строительной механики "Динамика сооружений". Все задачи для самостоятельного решения снабжены ответами, к которым проф Анохин Н.Н., готовя уже третий «решебник» по одному из важнейших разделов строительной механики, как всегда, подошел с особой тщательностью, перепроверя результаты ЭВМ.

Студент даже может ориентироваться в основном на эти пособия [1, 3], прибегая к помощи учебника [2] лишь для углубленного изучения того или иного вопроса. В основу книги положен многолетний опыт преподавательской работы автора в Московском государственном строительном университете (бывший МИСИ).

Полагаю, что тщательно и с любовью выполненная проф. Анохиным Н.Н. огромная работа принесет большую пользу всем, кто изучает строительную механику или по роду своей деятельности с ней связан.

Библиография

1. *Анохин Н.Н.* Строительная механика в примерах и задачах. Ч.Ш. Динамика сооружений: Учебное пособие – М.: изд-во АСВ, 2016. – 344 с.
2. *Леонтьев Н.Н., Соболев Д.Н., Амосов. А.А.* Основы строительной механики стержневых систем / Учебник. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. - 1996, 541 с.
3. *Анохин Н.Н.* Строительная механика в примерах и задачах. Ч.І. Статически определимые системы:– М.: изд-во АСВ, 1999. – 335 с.; Ч.ІІ. Статически неопределимые системы – М.: изд-во АСВ, 2000. – 464 с.

В.Н. Семенов,
*профессор МГСУ, Почетный профессор Международной академии
архитектуры (отделение в Москве), Москва*

Референция монографии по конструированию поверхностей пространственных конструкций, визуализации поверхностей в системах MathCad и AutoCad профессора Иванова В.Н. и Романовой В.А.

Материалы монографии В.Н. Иванова и В.А. Романовой [1] развивают основные положения, сформулированные в изданной в 2010 году «Энциклопедии аналитических поверхностей» [2], в которой была осуществлена систематизация, классификация и 3D – визуализация существующих поверхностей. При этом авторами справедливо отмечалось, что только доля процента существующего многообразия геометрических форм, разработанных геометрами (свыше 500), известны архитекторам и строителям. Как следствие, окружающий нас мир, в отличие от природы, ограничен небольшим разнообразием форм архитектурных зданий и сооружений.

В главе 1 рецензируемой публикации авторами рассмотрены вопросы формообразования и систематизации поверхностей сложных форм (с системой плоских координатных линий) на основе движения плоских кривых вдоль направляющей пространственной или плоской кривой. Для каждой поверхности и ее геометрических характеристик приведены выводы формул, выполнена компьютерная 3D-визуализация формы. В главе 2 рассмотрены способы построения сложных поверхностных форм на заданном многоугольном плане и 3D-визуализация этих форм. В главе 3 приведены фрагменты и наиболее рациональные способы построения программ для изображения различных видов поверхностей в системе MathCad. В главе 4 формирование наглядных графических изображений поверхностей по кинематическому способу образования осуществляется с помощью программного комплекса AutoCad и программного комплекса AutoLisp.

Результаты работы, представленные в монографии В.Н. Иванова и В.А. Романовой, являются блестящим примером использования графических изображений, как для самих теоретических исследований, так и для изысканий аналитических поверхностей.

В начале XX века немецкий исследователь Ф. Аурбах писал, что графический язык изображений богаче и говорит больше, чем всякий другой (например, язык математических формул) [3]. Первые результаты 3D-визуализации сложной формы поверхностей, представленные в виде мини-фильмов на сайте кафедры прочности материалов и конструкций РУДН, открывают, по существу, окно (пока щелочку) в электронный каталог формообразования фантастического мира архитектуры будущего. Тогда архитектор сможет за несколько минут выбрать наилучшее с технической и эстетической точки зрения решение [4].

В целом по форме и содержанию изложения замечаний не имеется. Материалы монографии обладают новизной, актуальны и будут широко востребованы как среди исследователей, конструкторов, архитекторов, дизайнеров, так и преподавателей, учащихся архитектурных и строительных учебных заведений.

Рекомендую к использованию в практической деятельности монографию В.Н. Иванова и В.А. Романовой «Конструкционные формы пространственных конструкций» [1].

Библиография

1. *Иванов В.Н., Романова В.А.* Конструктивные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad. – М.: Издательский дом АСВ, 2016. – 410 с.
2. *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Энциклопедия аналитических поверхностей. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 560 с.
3. *Аурбах Ф.* Графические изображения. – М.-Л.: Гос. Изд-во, 1928. – С. 12-13.
4. *Семенов В.Н.* Природа учит строить. – М.: Общество «Знание» РСФСР, 1964. – С. 29-30.

Требования к оформлению статей в журнал «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений»

Текст статьи подготавливается в виде компьютерной, готовой к изготовлению печатной матрицы, распечатки и варианта на электронном носителе. Текст распечатки должен быть четким. Формат текста с размером по вертикали 23 см и по горизонтали 13,5 см. Текст размещается в середине листа формата А4.

Поля рукописи должны быть следующие:

верхние и нижнее по 3,4 см; справа и слева по 3, 8 см.

Отступ первой строки абзаца – 0,75 см.

Текст подготавливается в системе *Word*, размер шрифта 11 пунктов. Шрифт *Times New Roman*, межстрочный интервал *одинарный*. Текст оформляется по аналогии с представленными в сборнике статьями. Обязательно использовать *автоматический перенос*.

Заголовок **СТРОЧНЫМИ** буквами, жирным шрифтом, центрируется (в заголовке не должно быть переносов).

После пропуска одной строки следует И.О. ФАМИЛИЯ, *ученая степень, ученое звание* (или *инженер, аспирант, студент*) (курсивом) автора. Соавтор аналогично.

С новой строки: *Организация* (место работы, курсивом). Если соавторы из разных организаций против каждого автора из одной организации ставится одна звездочка *, против авторов (соавторов) из другой организации – две звездочки ** (и т.д.). После последовательного перечисления всех авторов статьи (каждого с новой строки) следуют наименования организаций, предваренные * или ** (и т.д.) звездочками. Затем с новой строки следует полный почтовый и электронный адрес автора.

После пропуска одной строки следует *краткая аннотация статьи* (курсив, 10 пт) объемом не более 6-8 строк, затем после пропуска одной строки идут ключевые слова, и, наконец, после пропуска одной строки идет основной текст.

После основного текста следует: Л и т е р а т у р а (центрируется)

Далее идет пронумерованный список цитируемой литературы (Full –10). Авторы выделяются курсивом. Затем с новой строки следует: R e f e r e n c e s (центрируется) и повторяется цитируемая литература на английском языке или на родном языке, но латинскими буквами (Full – 9).

В заключительной части статьи приводятся **НАЗВАНИЕ** статьи (строчными жирными буквами), ф.и.о. авторов (централизуются) и перевод аннотации статьи на иностранный, предпочтительнее, английский язык. Затем с новой строки идут ключевые слова (KEY WORDS: ...) на английском языке.

Рисунки оформляются в тексте статьи предпочтительно средствами *Word* или других графических средств. Рисунки, оформленные отдельно от текста, должны полностью занимать страницу в пределах формата текста, на листе А4. Рисунки, выполненные чертежными средствами (тушью или черными чернилами), должны быть аккуратными с четкими надписями. Рисунки и надписи на них должны быть единым целым (сгруппированы) и не распадаться при их перемещении. Рисунки отделяются от текста на 6 пт.

Формулы в тексте статьи готовятся с помощью редактора формул *Microsoft equation* с установленными параметрами:

Full –11, Subscript/Suhtscript – 9, Sub- Subscript/Suhtscript – 7,

Symbol – 14, Subsymbol – 10.

Математика (функции) – латинские символы курсивом, греческие символы – прямым шрифтом. Между формулами и сверху, снизу от текста интервал 3 *pt*.

Номера страниц проставляются карандашом в левом нижнем углу страницы. Последняя страница предоставляется в двух экземплярах, второй экземпляр подписывается авторами статьи.

Аспирантам и соискателям желательно приложить к статье отзыв научного руководителя или специалиста по тематике статьи из организации, где выполняется работа.

Редакция имеет право снимать с публикации статьи, не отвечающие указанным требованиям, или, если на статью поступят два отрицательных отзыва рецензентов, или членов редакционного совета, или членов редколлегии журнала.