



Научно-технический журнал  
Издается с 2003 года.  
Выходит шесть раз в год.  
**№6 (44) 2012**  
**(ноябрь-декабрь)**

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

## Редакционный совет:

Голенков В.А. д.т.н., проф., председатель  
Радченко С.Ю. д.т.н., проф.,  
зам. председателя  
Борзенков М.И. к.т.н., доц., секретарь  
Астафичев П.А. д.ю.н., проф.  
Иванова Т.Н. д.т.н., проф.  
Киричек А.В. д.т.н., проф.  
Колчунов В.И. д.т.н., проф.  
Константинов И.С. д.т.н., проф.  
Новиков А.Н. д.т.н., проф.  
Попова Л.В. д.э.н., проф.  
Степанов Ю.С. д.т.н., проф.

## Главный редактор:

Колчунов В.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.

## Заместители главного редактора:

Данилевич Д.В. к.т.н., доц.  
Колесникова Т.Н. д. арх., проф.  
Коробко В.И. д.т.н., проф.

## Редколлегия:

Бондаренко В.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Гордон В.А. д.т.н., проф.  
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Клюева Н.В. советник РААСН, д.т.н., проф.  
Коробко А.В. д.т.н., проф.  
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Меркулов С.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Ольков Я.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Римшин В.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Сергейчук О.В. д.т.н., проф.  
Серпик И.Н. д.т.н., проф.  
Тур В.В. д.т.н., проф.  
Турков А.В. д.т.н., проф.  
Федоров В.С. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Чернышов Е.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Шах Р. д.т.н., проф.

## Ответственный за выпуск:

Солопов С.В. к.т.н.

## Адрес редакции:

302006, Россия, г. Орел,  
ул. Московская, 77  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: oantc@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство:  
ПИ № ФС77-47354 от 03 ноября 2011 г.

Подписной индекс 86294 по объединенному  
каталогу «Пресса России»

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012

## Содержание

### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

<b>Баширов Х.З., Дородных А.А., Колчунов В.И.</b> Ширина раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях	3
<b>Бухтиярова А.С., Колчунов В.И., Клюева Н.В., Колчунов В.И.</b> К построению расчетной схемы деформирования и трещинообразования составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций на основе модели двухконсольного элемента	8
<b>Гордон В.А., Кравцова Э.А.</b> Динамические догружения в балке с разноуровневыми продольными расслоениями	17
<b>Колчунов В.И., Прасолов Н.О., Кожаринова Л.В., Ветрова О.А.</b> К алгоритмизации задач расчета живучести железобетонных рам при потере устойчивости	28
<b>Коробко А.В., Прокуров М.Ю., Савин С.Ю.</b> Программа определения максимального прогиба упругих ортотропных пластинок на основе метода интерполяции по коэффициенту формы	35
<b>Меркулов С.И.</b> К вопросу о реконструкции и реновации конструктивных систем	42
<b>Травуш В.И., Антошкин В.Д., Ерофеев В.Т., Гудожников С.С.</b> Современные конструктивно-технологические решения сферических оболочек	45
<b>Серпик И.Н., Курченко Н.С.</b> Об определении рациональных параметров систем адаптации металлических рам к запроектным воздействиям	56
<b>Федоров В.С., Граминовский Н.А.</b> Исследование прочностных и деформативных характеристик высокопрочного бетона при нагреве для решения статической задачи огнестойкости	63

### Архитектура и градостроительство

<b>Колесникова Т.Н., Новицкая Е.С.</b> Проблемы экопозитивного градостроительного размещения и формирования генеральных планов детских дошкольных учреждений пригородных поселений индивидуальной застройки	69
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### Строительные материалы и технологии

<b>Батракова А.Г.</b> Определение толщины конструктивных слоев дорожных одежд с помощью георадара	75
<b>Заянчуковская Н.В., Лебедев Ю.Н.</b> Организация и технология проектирования объектов теплоэнергетики в условиях создания интегрированной информационной системы	82
<b>Малинин Г.В.</b> Деформация мартенситной неупругости при сложных траекториях изотермического нагружения в материалах с эффектом памяти формы	88
<b>Сахаров А.А., Федосов С.В., Елин Н.Н., Мизонов В.Е.</b> Ячеечная модель замерзания влаги в плоской теплопроводящей стенке	96
<b>Соломенцев А.Б., Куликова А.В.</b> Уплотняемость щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с различными добавками при пониженных температурах	102
<b>Федосов С.В., Щепочкина Ю.А., Баканов М.О.</b> Композиционный материал на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием	109
<b>Янченко В.С., Лукутцова Н.П., Королева Е.Л., Вылова А.С.</b> Применение методики гибридного автомата при компьютерном моделировании процесса производства железобетонных изделий	114

Журнал «Строительство и реконструкция» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук.



Scientific and technical journal  
The journal is published since 2003.  
The journal is published 6 times a year.

**№6 (46) 2012**  
**(November-December)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

The founder – federal state budgetary educational institution of the higher vocational training  
«State University – Educational-Science-Production Complex»  
(State University ESPC)

## Editorial council:

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
president

**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president

**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof.

**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.

**Ivanova T.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Popova L.V.** Doc. Ec. Tech., Prof.

**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editor-in-chief

**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editor-in-chief assistants:

**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech., Assis-  
tant Prof.

**Kolesnikova T.N.** Doc. Arc., Prof.

**Korobko V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editorial committee

**Bondarenko V.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Karpenko N.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kljueva N.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Korobko A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Korol E.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Merkulov C.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Olkov Y.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Rimshin V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Sergeychuk O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Serpik I.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Turkov A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Fyodorov V.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Chernyshov E.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Schach R.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Responsible for edition:

**Solopov S.V.** Candidat Sc. Tech

The edition address: 302006, Orel,

Street Moscow, 77

+7 (4862) 73-43-49

www.gu-unpk.ru

E-mail: oante@ostu.ru

Journal is registered in Russian federal service  
for monitoring communications, information  
technology and mass communications

The certificate of registration:

ПИ № ФС77-47354 from 03.04.11 r.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2012

## Contents

### Theory of engineering structures. Building units

- Bashirov H.Z., Dorodnyh A.A., Kolchunov V.I.** The width of third type tangential crack opening in composed reinforced concrete structures..... 3
- Buhtijarova A.S., Kolchunov V.I., Kljueva N.V., Kolchunov V.I.** Some additions to the analytical model of strain and crack formation for precast reinforced concrete structures under eccentric compression on the basis of a two-cantilever element model..... 8
- Gordon V.A., Kravtsova E.A.** Dynamic dogruzheniya in beams with multilevel longitudinal bundles..... 17
- Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Kozharinova L.V., Vetrova O.A.** Some considerations to the algorithm for survivability calculation of reinforced concrete frame structures at the moment of buckling..... 28
- Korobko A.V., Prokurov M.Ju., Savin S.Ju.** Program of definition maximum deflection of bent elastic orthotropic plates with using the interpolation technique by shape factor..... 35
- Merkulov S.I.** To the question of reconstruction and renovation of constructive systems..... 42
- Travush V.I., Antoshkin V.D., Erofeev V.T., Gudozhnikov S.S.** Mode constructive and technological solutions of spherical shells..... 45
- Serpik I.N., Kurchenko N.S.** About determination of rational parameters for adaptive systems of steel frames to emergency actions..... 56
- Fedorov V.S., Graminovskiy N.A.** Research of strength and deformative characteristics of high-strength concrete when heating for the solution of the static problem of fire resistance..... 63

### Architecture and town-planning

- Kolesnikova T.N., Novickaj E.S.** The problems of placement and general plan development for preschool institutions in suburban settlement area..... 69

### Construction materials and technologies

- Batrakova A.G.** Evaluation the pavement structural layers thickness with GPR. 75
- Zayanchukovskaya N.V., Lebedev U.N.** Organization and technology for design of thermal power facilities in the conditions of integrated information system development..... 82
- Malinin G.V.** Deformation of martensitny unelasticity at difficult trajectories of isothermal loading in materials with effect of memory of a form..... 88
- Sakharov A.A., Fedosov S.V., Elin N.N., Mizonov V.E.** A cell model of moisture freeze-up in a plane heat conducting wall..... 96
- Solomentsev A. B., Kulikova A. V.,** Compactibility of stone mastic asphalt mixes with additives at the lowered temperatures..... 102
- Fedosov S.V., Shchepochkina Ju.A., Bakanov M.O.** Composite material with the protectively-decorative covering..... 109
- Janchenko V.S., Lukutcova N.P., Koroleva E.L., Vypova A.S.** Application of the method of hybrid automaton in computer simulation of the process of manufacture of ferro-concrete..... 114

Journal is included into the List of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees

## **ШИРИНА РАСКРЫТИЯ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН ТРЕТЬЕГО ТИПА В СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

*Предложены аналитические зависимости для расчета ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях. Эти зависимости учитывают влияние ряда важных факторов: деформации арматуры в сечении с трещиной, параметры сцепления арматуры с бетоном, геометрические характеристики составного сечения, депланация бетона на поверхности конструкции по отношению к радиусу пограничного слоя, деформационный эффект, возникающий в железобетонном элементе после нагружения сплошности, относительные условные сосредоточенные взаимные смещения бетона и арматуры.*

**Ключевые слова:** ширина раскрытия трещин, сосредоточенный сдвиг, деформационный эффект, депланация бетона.

Процесс трещинообразования в элементах железобетонных конструкций и особенно элементах составного сечения – явление достаточно сложное. На сегодняшний день практически отсутствуют экспериментальные данные о взаимных сдвигах старого и нового бетона в зонах, прилегающих к шву. Не изучены эффекты, которые возникают при нарушении сплошности железобетона вследствие трещинообразования, крайне мало опытных данных о ширине раскрытия трещин вдоль всего профиля трещин, изменениях расстояния между трещинами по мере увеличения нагрузки и других особенностях рассматриваемого физического явления.

Из этого следует, что развитие исследований по детальному изучению особенностей трещинообразования и раскрытия наклонных трещин третьего типа (по классификации [1]) в железобетонных составных конструкциях с учетом несовместности деформаций бетона, арматуры, податливости шва между разными бетонами, нарушения сплошности материала является актуальной задачей. Для ее решения используем следующие исходные предпосылки:

– для средних деформаций бетона и арматуры в поперечном сечении считается справедливой гипотеза плоских сечений в пределах каждого из стержней, образующих составной железобетонный стержень; напряжения в бетоне и арматуре определяются с использованием билинейных диаграмм « $\sigma - \varepsilon$ »;

– образование трещин происходит после достижения растянутыми волокнами бетона вдоль оси поперечной (продольной) арматуры предельных деформаций; в процессе нагружения выделяется несколько уровней трещинообразования;

– связь между напряжениями сцепления  $\tau$  и относительными условными сосредоточенными взаимными смещениями поперечной (продольной) арматуры и бетона  $\varepsilon_g(x)$  (рис. 1) принимается в виде:  $\tau(x) = G\varepsilon_g(x)$ , где  $G$  – условный модуль деформаций сцепления арматуры с бетоном;

– учитывается депланация бетона в сечении с трещиной в зависимости от расстояния поверхности контакта с арматурой;

– раскрытие трещин – это накопление относительных условных сосредоточенных взаимных смещений арматуры и бетона на участках, расположенных по обе стороны от трещины (см. рис. 1), – развитие гипотезы Томаса;

– учитывается дополнительное деформационное воздействие в трещине, связанное с нарушением сплошности материала.

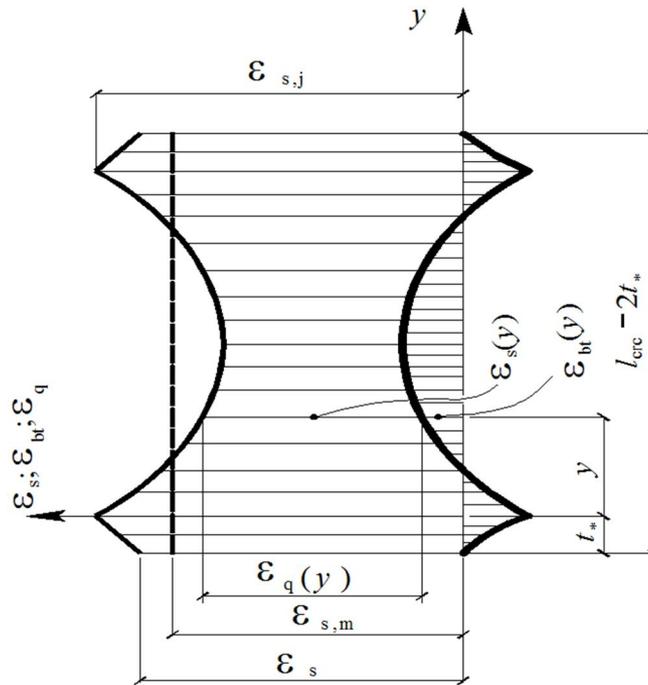


Рисунок 1 – Эпюры деформаций бетона  $\varepsilon_{bt}(y)$ , арматуры  $\varepsilon_{sw}(y)$  и их относительных взаимных смещений  $\varepsilon_g(y)$  на участке между наклонными трещинами в железобетонных конструкциях

Таким образом, в соответствии с предпоследней исходной предпосылкой задача по определению ширины раскрытия трещин ( $a_{cr}$ ) сводится к нахождению относительных взаимных смещений  $\varepsilon_g(y)$  арматуры и бетона на различных участках между трещинами:

$$\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw}(y) - \varepsilon_{bt}(y). \quad (1)$$

Деформации бетона  $\varepsilon_{bt}(x)$  определяются из условия равновесия блока, расположенного между сечением с трещиной и сечением, проходящим на расстоянии  $y+t_*$  от трещины (см. рис. 1).

Анализ характера эпюры  $\varepsilon_{bt}(y)$ , выполненный с привлечением разных авторов [2], показал, что при определенной величине нагрузки деформации на участках, примыкающих к трещинам, начинают уменьшаться и далее меняют знак. Деформации в середине участка между трещинами продолжают увеличиваться до тех пор, пока в этом месте не появится новая трещина.

Подставляя значения  $\varepsilon_{bt}(y)$ , определяемые в соответствии с методикой [2], в уравнение (1), получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_g(y) &= \varepsilon_{sw}(y) - \varepsilon_{sw} \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} + \varepsilon_{sw}(y) \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} - \frac{D_{14}}{D_{13}} \cdot y - \frac{D_{15}}{D_{13}} = \\ &= \varepsilon_{sw}(y) \left( 1 + \frac{E_{sw}(y) \cdot A_{sw}}{D_{13}} \right) - \varepsilon_{sw} \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} - \frac{D_{14}}{D_{13}} \cdot y - \frac{D_{15}}{D_{13}}. \end{aligned} \quad (2)$$

После подстановки в уравнение (2) выражения для деформаций арматуры  $\varepsilon_{sw}(y)$ , принятого на основании работы [1], получим:

$$\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw} + \left( \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw}} - \frac{S}{A_{sw} E_{sw}} \int_0^y \tau(y) dy \right) \cdot \left( 1 + \frac{E_{sw} \cdot A_{sw}}{D_{13}} \right) - \frac{D_{14}}{D_{13}} \cdot y - \frac{D_{15}}{D_{13}}. \quad (3)$$

В формулах (2), (3)  $S$  – периметр поперечного сечения арматуры;  $\varepsilon_{sw}$  – деформации арматуры в трещине;  $\Delta T$  – результирующая условных касательных напряжений в зоне, приле-

гающей к трещине;  $\tau(y)$  – условные касательные напряжения;  $D_{11}, D_{13}, D_{14}$  – параметры, определяемые из уравнений, приведенных в работе [2].

Введя обозначение:

$$\frac{1}{K} = 1 + \frac{E_{sw} \cdot A_{sw}}{D_{13}}$$

и принимая во внимание третью предпосылку, выражение (3) можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw} K} - \frac{S \cdot G}{A_{sw} E_{sw} K} \int_0^y \varepsilon_g(y) dy - \frac{D_{14}}{D_{13}} \cdot y - \frac{D_{15}}{D_{13}}. \quad (4)$$

Обозначив дробь перед интегралом константой  $B$ , характеризующей сцепление арматуры с бетоном, после дифференцирования функции смещений  $\varepsilon_g(y)$  получим:

$$\frac{d\varepsilon_g(y)}{dy} + B\varepsilon_g(y) = \frac{D_{14}}{D_{13}}. \quad (5)$$

Решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка (4) имеет вид:

$$\varepsilon_g(y) = C \cdot e^{-By} + \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (6)$$

При этом постоянная интегрирования  $C$  находится из граничного условия, в соответствии с которым при  $y = 0$ ,  $\varepsilon_g(y) = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{A_{sw} E_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{v_b E_b}$ :

$$C = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{A_{sw} E_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,c}}{v_b E_b} - \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}. \quad (7)$$

Здесь  $\frac{\sigma_{bt,c}}{v_b E_b}$  соответствует деформациям бетона  $\varepsilon_{bt}(y)$  в сечении, расположенном на расстоянии  $t_*$  от сечения с трещиной (см. рис. 1). При этом значения  $\sigma_{bt,c}$  принимаются со знаком минус. Теперь, в соответствии с принятой гипотезой о физической сущности явления «раскрытия трещин», можно записать:

$$a_{crc} = 2 \int_0^{t_*} \varepsilon_g(y_1) dy_1 + 2 \int_0^{0,5l_{crc} - t_*} \varepsilon_g(y) dy. \quad (8)$$

После интегрирования получим:

$$a_{crc} = -\frac{2\Delta T}{G} + \frac{2B_3}{B} (1 - e^{-B(0,5l_{crc} - t_*)}) + 2B_2(0,5l_{crc} - t_*), \quad (9)$$

где  $B_2, B_3$  и  $B_4$  определяются по формулам:

$$B_2 = \frac{D_{14}}{D_{13} \cdot B}; B_3 = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,s}}{v_b E_b} - B_2; B_4 = 1 + \frac{\sigma_{bt,c}}{(K-1)B_3 v_b E_b} + \frac{\varepsilon_{bt,u}}{B_3(K-1)}. \quad (10)$$

Тогда

$$l_{crc} = \frac{2(\ln B_4 - B t_*)}{-B} = \frac{2 \ln B_4}{-B} + 2 t_*; \quad (11)$$

$$B_3 = \varepsilon_{sw} + \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,s}}{v_b E_b} - B_2 = \frac{q_{sw} S}{E_{sw} A_{sw}} + B_{a,1}; \quad (12)$$

$$B_{a,1} = \frac{\Delta T}{E_{sw} A_{sw}} - \frac{\sigma_{bt,s}}{v_b E_b} - B_2; \quad (13)$$

$$B_4 = 1 + \frac{\sigma_{bt,c}}{(K-1)B_3 v_b E_b} + \frac{\varepsilon_{bt,u}}{B_3(K-1)} = 1 + \frac{1}{B_3} \cdot B_{a,2}; \quad (14)$$

$$B_{a,2} = \frac{1}{K-1} \cdot \left( \frac{\sigma_{bt,c}}{v_b E_b} + \varepsilon_{bt,u} \right). \quad (15)$$

Подставляя значения (12)-(14) в формулу (9), после соответствующих преобразований получим:

$$a_{crc} = -\frac{2\Delta T}{G} - \frac{2q_{sw}S}{A_{sw}E_{sw}} \cdot \frac{B_{a,1}}{B} \cdot \frac{B_{a,2} \cdot A_{sw}E_{sw}}{(q_{sw}S + B_{a,1}A_{sw}E_{sw})} - \frac{2B_2}{B} \ln \left( 1 + \frac{B_{a,2} \cdot A_{sw}E_{sw}}{q_{sw}S + B_{a,1}A_{sw}E_{sw}} \right). \quad (16)$$

При выполнении практических расчетов ширину раскрытия трещин, вычисленную по формуле (16), следует умножить на коэффициенты  $\varphi$ ,  $\eta$ , принятые в нормах [3] и учитывающие длительность действия нагрузки и профиль поверхности арматуры.

С ростом нагрузки ширина раскрытия трещин увеличивается с возрастанием деформаций, с одной стороны, а с другой стороны, онижаются с уменьшением расстояния между трещинами.

Полученные расчетные зависимости для определения ширины раскрытия наклонных трещин в железобетонных составных конструкциях учитывают влияние ряда важных факторов, таких как деформации арматуры в сечении с трещиной, параметры сцепления  $B$  арматуры с бетоном, геометрические характеристики составного сечения и характеристики бетона и арматуры, депланацию бетона на поверхности конструкции по отношению к радиусу пограничного слоя, деформационный эффект (возникающий в железобетонном элементе после нарушения сплошности), относительные условные сосредоточенные взаимные смещения бетона и арматуры и, в необходимых случаях, влияние поперечной силы  $Q$ . Кроме того, для расчета ширины раскрытия трещин весьма важным является определение расстояний между трещинами.

Из анализа полученных расчетных зависимостей следует, что существенное влияние на основные параметры железобетона (расстояние между трещинами ( $l_{crc}$ ) и ширина раскрытия трещин ( $a_{crc}$ )) оказывает деформационный эффект, возникающий в железобетонном элементе после нарушения сплошности, выраженный через результирующую условных касательных напряжений  $\Delta T$  в зоне, прилегающей к трещине (в формуле для определения ширины раскрытия трещин появляется слагаемое с обратным знаком), податливость шва между старым и новым бетоном в виде условного сосредоточенного сдвига, а также депланация бетона по отношению к арматуре. Учет эффекта нарушения сплошности железобетонных конструкций и податливости шва в виде условного сосредоточенного сдвига позволит существенно уточнить значения постоянной интегрирования  $C$  при решении задачи расчета ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
2. Баширов, Х.З. К определению деформаций растянутого бетона для расчета трещиностойкости железобетонных конструкций по наклонным сечениям [Текст] / Х.З. Баширов, А.А. Дородных, В.И. Колчунов, И.А. Яковенко, Н.В. Усенко // Весник гражданских инженеров. – 2012. – №5. – С. 50-54.
3. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – 156 с.

### **Баширов Хамит Закирович**

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва  
Кандидат технических наук  
Тел.: +7 (495) 681-43-81

### **Дородных Анна Алексеевна**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
Преподаватель кафедры «Проектирование, строительство зданий и линейных сооружений»  
Тел.: +7 (4712) 50-48-16

**Колчунов Владимир Иванович**

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина  
Доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных технологий строительства  
Тел.: +38 (044) 460-00-24  
E-mail: vikolchunov@mail.ru

---

H.Z. BASHIROV, A.A. DORODNYH, V.I. KOLCHUNOV

**THE WIDTH OF THIRD TYPE TANGENTIAL CRACK OPENING  
IN COMPOSED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

*The paper presents some analytical equations for calculation of the width of third type tangential crack opening in composed reinforced concrete structures. The equations comprise influences of ambient factors such as reinforcement strain at the section with crack opening, parameters of concrete-reinforcement bond, geometrical parameters of composed cross-section, warping of the surface of a reinforced concrete structure, strain effect due to damage of entirety, mutual concentrated shear deformations of concrete and reinforcement.*

**Keywords:** crack width, concentrated shear, strain effect, warping of concrete.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Bondarenko, V.M. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona [Tekst] / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – M.: ASV, 2004. – 472 c.
2. Bashirov, H.Z. K opredeleniju deformacij rastjanutogo betona dlja rascheta treshhinostojskosti zhelezobetonnyh konstrukcij po naklonnym sechenijam [Tekst] / H.Z. Bashirov, A.A. Dorodnyh, V.I. Kolchunov, I.A. Jakovenko, N.V. Usenko // Vesnik grazhdanskih inzhenerov. – 2012. – №5. – S. 50-54.
3. SP 63.13330.2012 Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii [Tekst]. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003. – 156 s.

**Bashirov Hamit Zakirovich**

Moscow state university of railway engineering, Moscow  
Candidate of technical science  
Тел.: +7 (495) 681-43-81

**Dorodnyh Anna Alekseevna**

Southwest state university, Kursk  
Teacher of department «Design, construction of buildings and linear constructions»  
Ph.: +7 (4862) 76-03-72

**Kolchunov Vladimir Ivanovich**

National aviation university, Kiev, Ukraine  
Doctor of technical sciences, professor of computer technology building department  
Тел.: +38 (044) 460-00-24  
E-mail: vikolchunov@mail.ru

БУХТИЯРОВА А.С., КОЛЧУНОВ В.И., КЛЮЕВА Н.В., КОЛЧУНОВ Вл.И.

## К ПОСТРОЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДВУХКОНСОЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА\*

*Предложена упрощенная расчетная схема для раскрытия статической неопределенности задачи определения напряженно-деформированного состояния составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций после нарушения их сплошности и расчетная методика определения кривизны и прогибов составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций.*

**Ключевые слова:** внецентренно сжатые железобетонные конструкции, двухконсольный элемент, деформирование, трещинообразование, напряженно-деформированное состояние.

Одной из основных особенностей деформирования, трещинообразования и разрушения составных конструкций является общая работа двух бетонов с разными свойствами прочности и деформативности. Этим определяется ряд специфических параметров расчета и конструирования, связанных с перераспределением внутренних усилий между двумя бетонами.

Отсутствие теоретического обоснования и анализа экспериментальных данных вынудило в свое время отдать предпочтение эмпирическим методам расчета, в том числе по деформациям. В результате действующие в рамках Федерального закона №ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» нормативные документы и руководства по расчету, как правило, построены на эмпирических зависимостях. Такие зависимости, как известно, пригодны лишь для определенного диапазона изменения параметров, оказывающих влияние на расчет, что требует непрерывного трудоемкого и дорогостоящего экспериментирования.

В последние годы все большее внимание для совершенствования расчета железобетонных конструкций уделяется методам механики разрушения, т.к. после появления трещин гипотезы и методы механики сплошной среды уже неприменимы (тем не менее, в механике твердого деформируемого тела гипотеза сплошности материала является основной). Вопросы, связанные с исследованием напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины, наиболее полно изучены в механике разрушения. До настоящего времени практически отсутствуют разработки, устанавливающие зависимость традиционных параметров железобетона с характеристиками механики разрушения. Многие связанные с этим эффекты нуждаются в выяснении их физической сути и, в первую очередь, эффект, связанный с нарушением сплошности железобетона [1].

В железобетонных конструкциях после появления трещин понятие жесткости исчезает, и поэтому использование формул строительной механики для расчета перемещений вызывает определенные трудности. Между тем, при совершенствовании и создании новых конструктивных систем пониженной материалоемкости расчет по деформациям все чаще из проверочного становится определяющим.

Специфика расчета составных железобетонных конструкций после появления трещин состоит в определении кривизны в условиях, когда традиционное понятие жесткости исчезает. Для получения исходного выражения кривизны рассмотрим участок железобетонного элемента с трещинами в растянутой зоне (рис. 1).

Укорочение бетона в крайнем волокне сжатой зоны на участке длиной  $l_{crc}/2$  равно  $\Delta l_b = \varepsilon_{bm} l_{crc}/2$ , а удлинение арматуры на том же участке  $\Delta l_s = \varepsilon_{sm} l_{crc}/2$ .

\* Исследования выполнены при поддержке Правительства Орловской области в рамках проекта № 12-08-97598 «Моделирование процесса деформирования и трещинообразования бетона в сложнапряженных железобетонных элементах и установление инвариантов его разрушения».

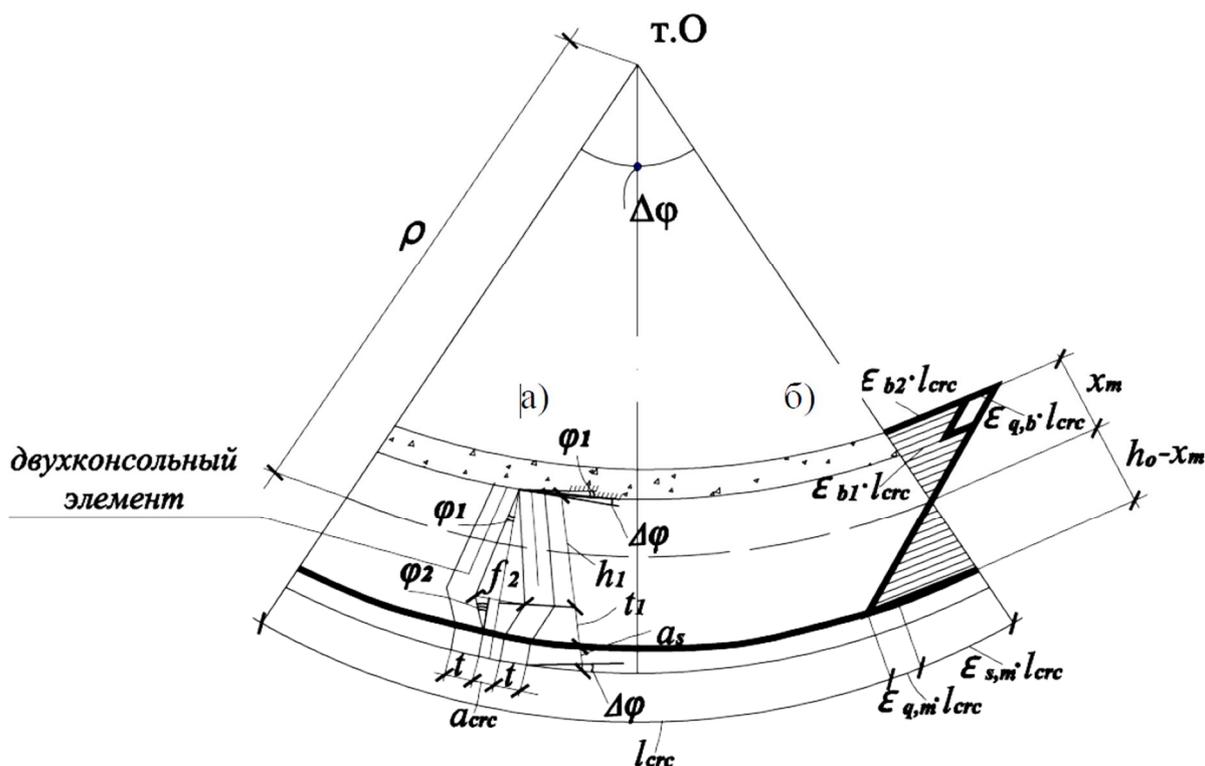


Рисунок 1 – Схема перемещений в окрестности трещины (а) и схема деформаций в сечении составного внецентренно сжатого железобетонного элемента (б)

Через  $\varepsilon_{bm}$  и  $\varepsilon_{sm}$  обозначены средние деформации крайнего сжатого волокна бетона и растянутой арматуры. Через  $\varepsilon_{gm}$  и  $\varepsilon_{g,b}$  обозначены средние относительные смещения на уровне арматуры и бетона и в шве между бетонами. Имея в виду разные знаки деформаций удлинения и укорочения относительно нейтральной оси, можно записать:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{b,2} + \varepsilon_{g,b} + \varepsilon_{sm} + \varepsilon_{gm}}{h_0} \quad (1)$$

Для железобетонных конструкций при наличии трещин кривизна записывается для участков, равных расстоянию между трещинами ( $l_{crc}$ ), поэтому представляется логичным и углы поворота изогнутой оси стержня рассматривать в пределах этих же участков. Это равносильно замене кривой изогнутой оси стержня на ломаную, вписанную в кривую.

Тогда, в пределах каждого участка угол перелома граней, вписанного в кривую многогранника, можно определить по формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{l_{crc}}{\rho} \quad (2)$$

В окрестности вершины иной трещины увеличенный из-за нарушения сплошности бетона угол поворота  $\varphi_1$  определяется из простых геометрических соотношений (см. рис. 1, а):

$$\varphi_1 = \frac{0,5f}{h_1} \geq \Delta\varphi \quad (3)$$

Здесь максимальная ширина раскрытия трещины в точке перелома двухконсольного элемента  $f$ , с одной стороны, может быть определена по методу начальных параметров:

$$f = 0,5a_{crc} + (\varphi_2 + \Delta\varphi)t_1 + X_3 \frac{t_1^2}{2B(\lambda)} + X_1 \frac{t_1^3}{6B(\lambda)}, \quad (4)$$

где параметры  $X_1$  и  $X_3$  приняты в соответствии с работой [2];  $B(\lambda)$  – жесткость консоли двухконсольного элемента (ДКЭ) с учетом пластических деформаций ( $B(\lambda) \leq EI_{red}$ );  $t_1$  – расстояние от оси рабочей арматуры до точки перелома двухконсольного элемента.

С другой стороны,  $f$  отыскивается как параметр, равный  $a_{crc}k_r$ , где с помощью коэффициента  $k_r$  учитывается депланация берегов трещины в соответствии с работами [1, 2]. Приравнивая эти два значения  $f$ , можно уточнить значение жесткости консоли двухконсольного элемента  $B(\lambda)$ .

Проведенный анализ показывает, что заделки двухконсольного элемента при раскрытии трещины поворачиваются на углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  соответственно (см. рис. 1, а). При этом полный деформационный угол поворота заделки возле вершины трещины составляет  $\varphi_1 + \Delta\varphi$ .

Аналогичный анализ заделки консоли в месте пересечения рабочего арматурного стержня показывает, что деформационный угол поворота заделки в месте пересечения рабочего арматурного стержня составит  $\varphi_2 - \Delta\varphi$ .

В рассматриваемой зоне угол поворота  $\varphi_2$  определяется из простых геометрических соотношений:

$$\varphi_2 = \frac{0,5f}{t_1} = \frac{0,5a_{crc}k_r}{t_1} \geq \Delta\varphi. \quad (5)$$

Располагая значениями угловых деформаций в заделках консоли ДКЭ, можно переходить к построению расчетной схемы деформирования и трещинообразования составного внецентренно сжатого железобетонного элемента на основе модели ДКЭ.

Для тела с трещиной, где нарушается его сплошность при установлении связи между напряжениями и перемещениями, методы, разработанные в теории упругости, пластичности и сопротивлении материалов, неприменимы. Тем не менее, традиционное использование основополагающего метода сечений применительно к материалу с трещинами приносит свои положительные результаты.

Рассмотрение модели двухконсольного элемента, включающего трещину, применительно к стержневому железобетонному элементу имеет свою специфику. Трещина должна быть увязана не только с задачей определения напряженно-деформированного состояния поперечного сечения железобетонного элемента, но и с задачей распределения сцепления между арматурой и бетоном, т.к. появление трещины в сплошном теле можно рассматривать как некоторое деформационное воздействие, отражающееся на особенностях сцепления арматуры и бетона в зонах, прилегающих к трещине. Модель двухконсольного элемента используется здесь в качестве связующего звена между зависимостями механики твердого деформируемого тела и механики разрушения.

Изложенные выше соображения были использованы при выделении из конструкции двухконсольного элемента, приведенного на рисунке 2, а. Здесь фактическое распределение растягивающих напряжений близко к прямоугольнику (со значением  $\sigma_{bt}$ ). Распределение сжимающих напряжений в этих же сечениях на участках, прилегающих к арматуре, для выполнения практических расчетов принято по треугольнику.

Для определения неизвестного  $\Delta T$  воспользуемся выражением величины  $\zeta_{bu}$  как функции податливости. Эта функция может быть найдена из определения скорости высвобождения энергии [3]:

$$\zeta_{bu} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left( \frac{\delta W - \delta V}{\delta A} \right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA}, \quad (6)$$

где  $\delta V$  – уменьшение потенциальной энергии тела при продвижении трещины на малое приращение  $\delta A$ ;  $\delta W$  – дополнительная работа, совершаемая над телом при продвижении трещины на малое приращение  $\delta A$ ;  $A$  – площадь образовавшейся поверхности трещины.

Выполнив почленное дифференцирование и сделав алгебраические преобразования, можно записать нелинейное дифференциальное уравнение, из которого несложно найти касательные напряжения и, соответственно, сдвигающие усилия  $\Delta T$  в зоне, непосредственно прилегающей к трещине, как функцию от  $h_{crc}$ ,  $R_{bt}$ ,  $E_b$ ,  $t_b$ ,  $b$ ,  $I_{can}$ ,  $\zeta_{bu}$ .

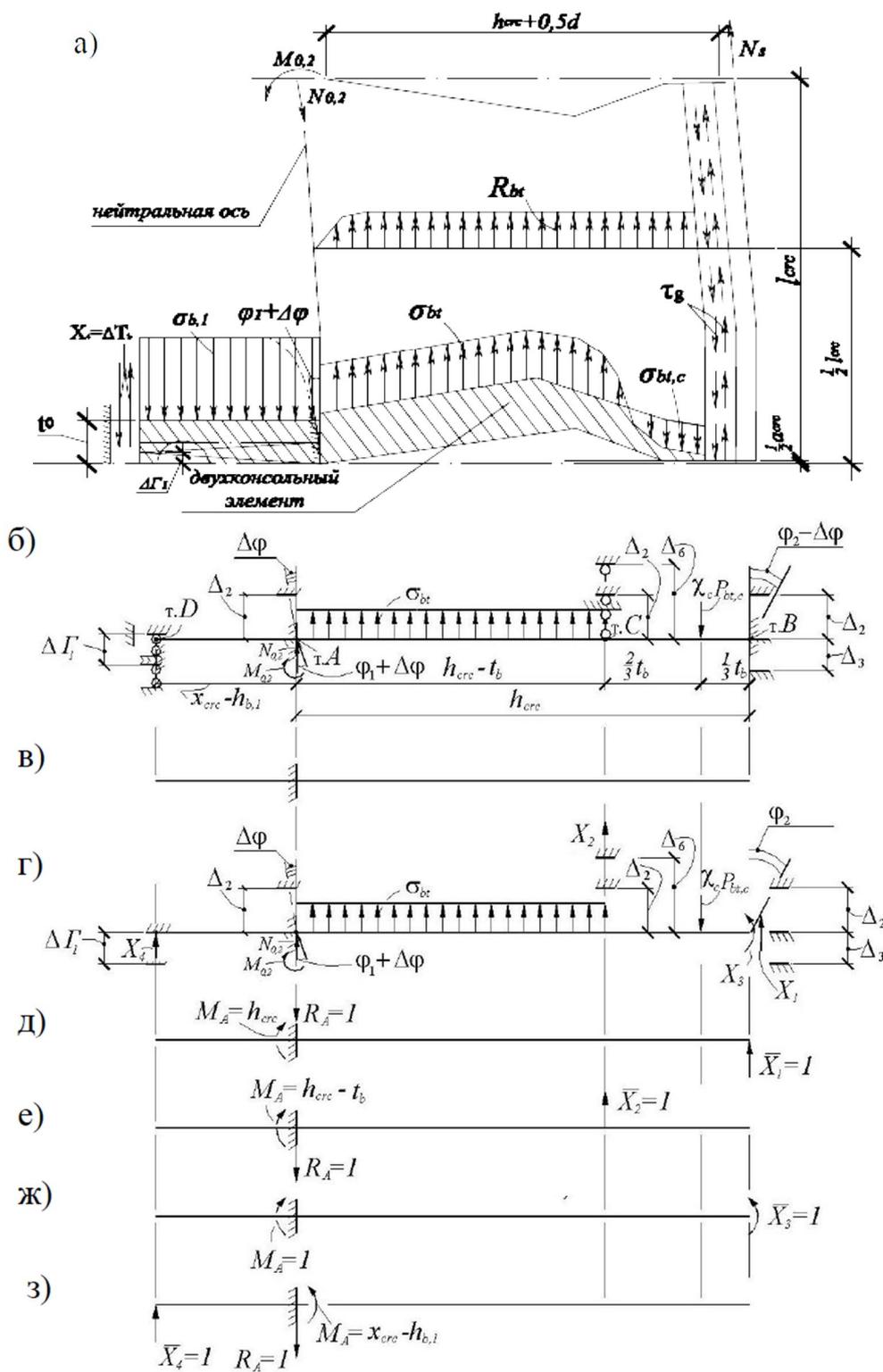


Рисунок 2 – Схемы напряженно-деформированного состояния и расчетная схема двухконсольного элемента (ДКЭ): а – характерные эпюры напряжений в окрестности трещины (с учетом симметрии); б, в – расчетная схема и основная схема; г – эквивалентная система; д-з – единичные состояния

Именно здесь, как показали экспериментальные и численные исследования [1, 3], происходит резкое возмущение касательных напряжений, сопровождающееся их скачкообразным увеличением и сменой знака. При этом изменяется знак и на эпюре нормальных напряжений в бетоне (из растягивающих она превращается в сжимающие). Причина таких изменений заключается в том, что после образования трещин сплошность бетона нарушается, и его деформирование уже не подчиняется законам сплошного тела. В зонах, прилегающих к трещинам,

возникает концентрация деформаций, которая перенасыщает «потребность системы» (состоящей из бетонных блоков и арматуры при заданной статической схеме) в деформациях. Таким образом, в трещинах возникает дополнительное деформационное воздействие, которое и вызывает замеченный в опытах эффект (его необходимо учитывать в расчете).

Для железобетонных конструкций характерным является то, что в стадии II трещины практически сразу (т.к. в зоне растягивающих напряжения развитие трещин неустойчиво) развиваются до нейтральной оси, а затем, попав в зону тормозящих сжимающих напряжений, медленно прорастают лишь на несколько миллиметров. В этом случае длину трещины  $h_{crc}$  можно рассматривать как величину постоянную (изменяется лишь раскрытие трещин). Это значительно упрощает определение сдвигающих усилий в зонах, прилегающих к трещине (без использования функционала (6)). Тем не менее, при построении расчетной схемы для определения усилий в зоне, прилегающей к трещине, кроме распределенной нагрузки интенсивностью  $\sigma_{bt} = \chi R_{bt}$  необходимо учесть деформационные воздействия, связанные с раскрытием трещины, а также со спецификой сопротивления бетона в околоарматурной зоне при раскрытии трещины.

Здесь деформационные воздействия  $\Delta_2 \dots \Delta_6$  обусловлены раскрытием трещины и относительными перемещениями (см. рис. 2, б, г и рис. 3):  $\Delta_2$  обусловлены смещением продольной геометрической оси консоли, вызванном деформациями укорочения от продольной сжимающей силы, приложенной на нейтральной оси, в сечении железобетонного элемента, проходящем по трещине;  $\Delta_3$  и  $\Delta_6$  обусловлены раскрытием трещины на уровне оси арматуры и в месте максимального раскрытия и равны половине (ввиду симметрии) этих значений. Особенности угловых перемещений  $\varphi_1, \varphi_2, \Delta\varphi$  подробно рассмотрены выше (см. формулы 2, 3 и 5). Остальными деформационными воздействиями можно пренебречь.

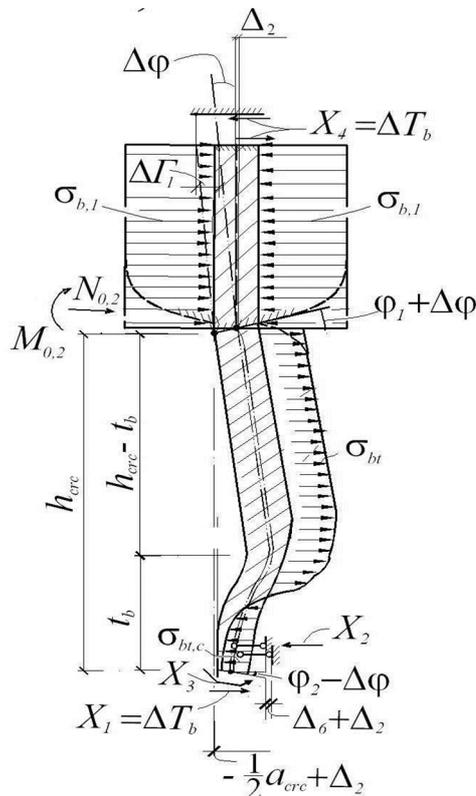


Рисунок 3 – К расчету податливости консоли

На основании теоремы о взаимности работ работа сил действительного состояния в эквивалентной системе (рис. 2, г) на перемещения первого единичного состояния (рис. 2, д) равна работе сил первого единичного состояния на перемещениях действительного состояния:

$$X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{21} + X_3 \delta_{31} + A_{P1} = (-\Delta_3 + \Delta_2) - \Delta_2 - h_{crc} \cdot (\varphi_1 + \Delta\varphi). \quad (7)$$

С учетом того, что  $\delta_{21} = \delta_{12}$ ;  $\delta_{31} = \delta_{13}$ ;  $\delta_{32} = \delta_{23}$ ;  $A_{P1} = A_{1P} = 1 \cdot \Delta_{1P}$ ;  $A_{P2} = A_{2P} = 1 \cdot \Delta_{2P}$ ;  $A_{P3} = A_{3P} = 1 \cdot \Delta_{3P}$ ;  $A_{P4} = A_{4P} = 1 \cdot \Delta_{4P}$  уравнение (7) и три ему аналогичные приобретают обычный вид канонических уравнений метода сил:

$$\begin{cases} X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} + X_3\delta_{13} + \Delta_{1P} - (-\Delta_3 + \Delta_2) + \Delta_2 + h_{crc} \cdot (\varphi_1 + \Delta\varphi) = 0; \\ X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + X_3\delta_{23} + \Delta_{2P} - (\Delta_6 + \Delta_2) + \Delta_2 + (h_{crc} - t_b) \cdot (\varphi_1 + \Delta\varphi) = 0; \\ X_1\delta_{31} + X_2\delta_{32} + X_3\delta_{33} + \Delta_{3P} + (\varphi_2 - \Delta\varphi) + (\varphi_1 + \Delta\varphi) = 0; \\ X_4\delta_{44} = 1 \cdot (-\Delta\Gamma_1) - 1 \cdot \Delta_2 + (x_{crc} - h_{b,1}) \cdot \Delta\varphi. \end{cases} \quad (8)$$

В соответствии со схемой (рис. 4) вычисляем коэффициенты при неизвестных:

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \frac{1}{3} h_{crc}^3; \quad \delta_{22} = \frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \frac{1}{3} (h_{crc} - t_b)^3; \\ \delta_{12} = \delta_{21} &= \frac{1}{E(\lambda)I_{con}} (h_{crc} - t_b)^2 \left( \frac{1}{3} h_{crc} + \frac{1}{6} t_b \right); \quad \delta_{33} = \frac{1}{E(\lambda)I_{con}} h_{crc}; \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= \frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \frac{1}{2} h_{crc}^2; \quad \delta_{23} = \delta_{32} = -\frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \frac{1}{2} (h_{crc} - t_b)^2; \quad \delta_{44} = \frac{(x_{crc} - h_{b,1})^3}{3E(\lambda)I_{con}}; \\ \Delta_{1P} &= -\frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \left[ \frac{\chi R_{bt} b}{24} (h_{crc} - t_b)^3 (3h_{crc} + t_b) - (h_{crc} - \frac{1}{3} t_b)^2 \left( \frac{1}{3} \chi_c P_{bt,c} \right) \cdot (h_{crc} + \frac{1}{6} t_b) \right]; \\ \Delta_{2P} &= -\frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \left[ \frac{\chi R_{bt} b}{8} (h_{crc} - t_b)^4 - \frac{1}{3} (h_{crc} - t_b)^2 \chi_c P_{bt,c} \cdot h_{crc} \right]; \\ \Delta_{3P} &= -\frac{1}{E(\lambda)I_{con}} \left[ \frac{\chi R_{bt} b}{6} (h_{crc} - t_b)^3 - \frac{1}{2} \chi_c P_{bt,c} \cdot (h_{crc} + \frac{1}{3} t_b)^2 \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

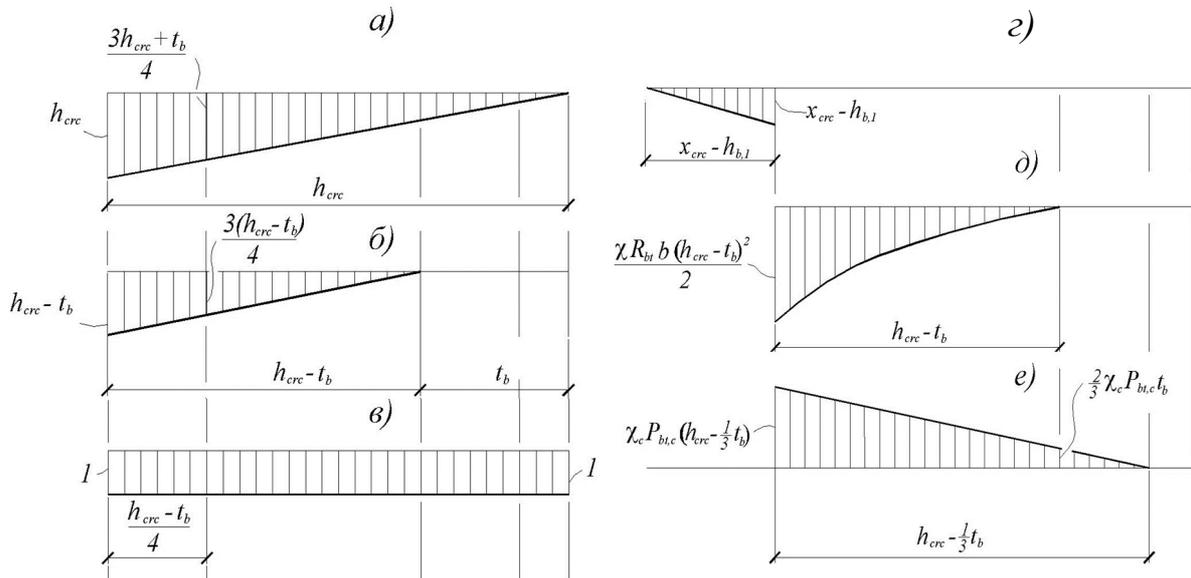


Рисунок 4 – Единичные (а-г) и грузовые (д, е) эпюры для раскрытия статической неопределенности ДКЭ

Здесь значение параметра  $\chi$  для практических расчетов принимается равным 0,8.

Подставляя полученные коэффициенты (9) в систему уравнений (8), получим следующие значения неизвестных:

$$X_3 = X_1 \left( -\frac{2}{3} \right) h_{crc} + X_2 \left( -h_{crc} + t_b \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{3} h_{crc} + \frac{1}{6} t_b \right) \frac{2}{h_{crc}^2} - A. \quad (10)$$

$$X_2 = X_1 \left( -\frac{1}{3} h_{crc} - \frac{1}{6} t_b \right) \frac{3}{(h_{crc} - t_b)} + \frac{3}{2} X_3 \frac{1}{(h_{crc} - t_b)} + B. \quad (11)$$

$$X_1 = X_2 (h_{crc} - t_b)^2 \frac{1}{h_{crc}^2} - \frac{2}{h_{crc}} X_3 - C. \quad (12)$$

В уравнениях (10)-(12) коэффициенты А, В и С соответственно равны:

$$A = \frac{\chi R_{bt} b}{12} (h_{crc} - t_b)^3 (3h_{crc} + t_b) \frac{1}{h_{crc}^2} - (h_{crc} - \frac{1}{3} t_b)^2 \cdot (\frac{1}{3} \chi_c P_{bt,c}) \times \\ \times (h_{crc} + \frac{1}{6} t_b) \cdot \frac{2}{h_{crc}^2} + (\Delta_3 + h_{crc} (\varphi_1 + \Delta\varphi)) \cdot E(\lambda) I_{con} \frac{2}{h_{crc}^2}. \quad (13)$$

$$B = -\frac{3}{8} \chi R_{bt} b \cdot (h_{crc} - t_b) + \frac{\chi_c P_{bt,c} h_{crc}}{(h_{crc} - t_b)} + \frac{3}{(h_{crc} - t_b)^3} (\Delta_6 + (h_{crc} - t_b) (\varphi_1 + \Delta\varphi)) E(\lambda) I_{con}. \quad (14)$$

$$C = \frac{\chi R_{bt} b}{6} (h_{crc} - t_b)^3 \frac{1}{h_{crc}^2} - \chi_c P_{bt,c} \cdot (h_{crc} - \frac{1}{3} t_b)^2 \frac{1}{h_{crc}^2} + (\varphi_2 + \varphi_1) E(\lambda) I_{con} \frac{2}{h_{crc}^2}. \quad (15)$$

Подставляя (12) в (10), получим:

$$X_3 = X_2 \cdot A_1 + A_2, \quad (16)$$

$$\text{где } A_1 = 3 \cdot (h_{crc} - t_b)^2 \cdot \left[ 2h_{crc} + \left( \frac{1}{3} h_{crc} + \frac{1}{6} t_b \right) \frac{2}{h_{crc}^2} \right]; \quad (17)$$

$$A_2 = 3 \cdot A - 2 \cdot C \cdot h_{crc}. \quad (18)$$

Подставляя (12) и (16) в (11), после алгебраических преобразований получим:

$$X_2 = \frac{B_2}{B_1} \leq \frac{R_b b t_b}{2}, \quad (19)$$

$$\text{где } B_1 = 1 - \left( \frac{1}{3} h_{crc} + \frac{1}{6} t_b \right) (h_{crc} - t_b) \frac{3}{h_{crc}^2} + A_1 \frac{6}{h_{crc}} \left( \frac{1}{3} h_{crc} + \frac{1}{6} t_b \right) \frac{1}{(h_{crc} - t_b)} + A_1 \frac{3}{2} \frac{1}{(h_{crc} - t_b)}. \quad (20)$$

$$B_2 = -A_2 \frac{3}{2} \frac{1}{(h_{crc} - t_b)} - B - A_2 \frac{6}{h_{crc}} \left( \frac{1}{3} h_{crc} + \frac{1}{6} t_b \right) \frac{1}{(h_{crc} - t_b)} - C \left( \frac{1}{3} h_{crc} - \frac{1}{6} t_b \right) \frac{3}{(h_{crc} - t_b)}. \quad (21)$$

Тогда из (16) следует:

$$X_3 = X_2 \cdot A_1 + A_2 \leq M_s. \quad (22)$$

Из уравнений (17) следует:

$$X_1 = X_2 (h_{crc} - t_b)^2 \frac{1}{h_{crc}^2} - \frac{2}{h_{crc}} (X_2 \cdot A_1 + A_2) - C \leq 0,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot t_b \cdot R_b. \quad (23)$$

Из уравнения (8) с учетом значения  $\delta_{44}$  получим:

$$X_4 = \Delta T_b = \frac{3E(\lambda)I_{con}(-\Delta\Gamma_1 - \Delta_2 + (x_{crc} - h_{b,1}) \cdot \Delta\varphi)}{(x_{crc} - h_{b,1})^3} \leq \Delta T_{b,R}. \quad (24)$$

Введенные в (19), (22), (23) и (24) ограничения полностью обеспечивают сохранение физического смысла расчетных параметров двухконсольного элемента.

Здесь  $\Delta T$  и  $\Delta T_b$  – сдвигающие силы в зоне, прилегающей к арматурному стержню и к шву между старым и новым бетоном (см. рис. 2, 3);  $\Delta\Gamma_1$ ,  $\Delta\Gamma_2$  определяется в соответствии со скорректированным ниже решением А.Р. Ржаницына [4] при внецентренном сжатии составного стержня.

$$\Delta\Gamma_1 = \varepsilon_u \cdot t_* = \left[ -\frac{N_{0,2} + \Delta T_b}{E_{b2}(\lambda)A_{b,2,red}} + \frac{(x_{crc} - h_{b,1})}{\rho} \right] \cdot t_*; \quad (25)$$

$$\Delta\Gamma_2 = \varepsilon_e \cdot t_* = \left[ -\frac{N_{0,1} + \Delta T_b}{E_{b1}(\lambda)A_{b,1,red}} + \frac{0,5h_{b,1}}{\rho} \right] \cdot t_*. \quad (26)$$

В формулах (25) и (26):

$$\Delta T_b = \tau_m \cdot t_*; \quad (27)$$

$$\tau_m = 0,5(\tau_{\max} + \tau_1); \quad (28)$$

$$\tau_1 = \frac{\xi \cdot \Delta}{\lambda} \cdot \frac{sh \lambda (0,5l_{crc} - t_*)}{ch \lambda \cdot 0,5l_{crc}}; \quad (29)$$

$$\Delta = -\frac{N_{0,1}}{E_{b,1}(\lambda)A_{b,1}} + \frac{N_{0,2}}{E_{b,2}(\lambda)A_{b,2}} - \frac{(x_{crc} - 0,5h_{b,1})}{\rho}; \quad (30)$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma} = \sqrt{\xi \left[ \frac{1}{E_{b,1}(\lambda)A_{b,1}} + \frac{1}{E_{b,2}(\lambda)A_{b,2}} \frac{(x_{crc} - 0,5h_{b,1})^2}{M \cdot \rho} \right]}, \quad (31)$$

где  $\xi$  – податливость шва (определяется на основании экспериментальных исследований составных призм [5]).

После этого определяются относительные условные взаимные смещения деформаций  $\varepsilon_{q,b}$  в шве:

$$\varepsilon_{q,b} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{t_*}. \quad (32)$$

В итоге раскрывается статическая неопределимость внецентренно сжатого железобетонного составного элемента после нарушения сплошности бетона. Таким образом, исследовано деформирование и предложена методика расчета составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций по определению кривизны после появления трещин на основе модели двухконсольного элемента (ДКЭ). Рассмотрена специфика построения двухконсольного элемента в зонах, прилегающих к трещинам, применительно к составным внецентренно сжатым железобетонным конструкциям, и предложена расчетная схема для раскрытия статической неопределимости ДКЭ с учетом эффекта нарушения сплошности бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
2. Верюжский, Ю.В. Методы механики железобетона [Текст] / Ю.В. Верюжский, Вл.И. Колчунов. – К.: Кн. изд-во НАУ, 2005. – 653 с.
3. Казаков, Д.В. Методика экспериментального определения кривиз и эффекта нарушения сплошности при трещинообразовании в составных железобетонных элементах [Текст] / Д.В. Казаков, Вл.И. Колчунов, В.С. Федоров // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ. – 2010. – №6 (32). – С. 21-24.
4. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.
5. Колчунов, В.И. К определению приведенного модуля сдвига зоны контакта составных железобетонных элементов [Текст] / В.И. Колчунов, Я.Е. Колчин // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2011. – №3. – С. 12-16.

### **Бухтиярова Анастасия Сергеевна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и материалы»

### **Колчунов Виталий Иванович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

### **Клюева Наталия Витальевна**

Юго-западный государственный университет, г. Курск  
Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Проектирование, строительство зданий и линейных сооружений»  
Тел.: +7 (4712) 50-48-16  
E-mail: klynavit@yandex.ru

**Колчунов Владимир Иванович**

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных технологий строительства

Тел.: +38 (067) 208-78-54

E-mail: vkolchunov@mail.ru

---

A.S. BUHTIJAROVA, V.I. KOLCHUNOV, N.V. KLJUEVA, VI.I. KOLCHUNOV

**SOME ADDITIONS TO THE ANALYTICAL MODEL OF STRAIN AND CRACK FORMATION FOR PRECAST REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER ECCENTRIC COMPRESSION ON THE BASIS OF A TWO-CANTILEVER ELEMENT MODEL**

*The paper presents simplified analytical scheme for disclosure of statically indeterminate condition for determination of stress-strain state of composed reinforced concrete elements under eccentric compression after damage of their entirety. Authors also give the calculation method for determination of curvature and deflection values of composed reinforced concrete structural elements under eccentric compression.*

**Keywords:** reinforced concrete structural elements under eccentric compression, two-cantilever element, strain, crack formation, stress-strain state.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Bondarenko, V.M. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona [Tekst] / V.M. Bondarenko, VI.I. Kolchunov. – M.: ASV, 2004. – 472 c.
2. Verjuzhskij, Ju.V. Metody mehaniki zhelezobetona [Tekst] / Ju.V. Verjuzhskij, VI.I. Kolchunov. – K.: Kn. izd-vo NAU, 2005. – 653 s.
3. Kazakov, D.V. Metodika jeksperimental'nogo opredelenija kriviz i jeffekta narushenija sploshnosti pri treshhinoobrazovanii v sostavnyh zhelezobetonnyh jelementah [Tekst] / D.V. Kazakov, VI.I. Kolchunov, V.S. Fedorov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: OrelGTU. – 2010. – №6 (32). – S. 21-24.
4. Rzhanicyn, A.R. Sostavnye sterzhni i plastinki [Tekst] / A.R. Rzhanicyn. – M.: Strojizdat, 1986. – 316 s.
5. Kolchunov, V.I. K opredeleniju privedennogo modulja sdviga zony kontakta sostavnyh zhelezobetonnyh jelementov [Tekst] / V.I. Kolchunov, Ja.E. Kolchin // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2011. – №3. – S. 12-16.

**Buhtijarova Anastasiya Sergeevna**

State university – educational-science-production complex, Orel

Senior teacher of department «Building designs and materials»

**Kolchunov Vitalij Ivanovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Doctor of technical sciences, professor, head of department «Construction structures and materials»

E-mail: skimkafedra@yandex.ru

**Klyueva Natalia Vitaljevna**

Southwest state university, Kursk

Doctor of technical science, professor, head of department «Design, construction of buildings and linear constructions»

Ph.: +7 (4712) 50-48-16

E-mail: klynavit@yandex.ru

**Kolchunov Vladimir Ivanovich**

National aviation university, Kiev, Ukraine

Doctor of technical sciences, professor of computer technology building department

Ph.: +38 (067) 208-78-54

E-mail: vkolchunov@mail.ru

ГОРДОН В.А., КРАВЦОВА Э.А.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ДОГРУЖЕНИЯ В БАЛКЕ С РАЗНОУРОВНЕВЫМИ ПРОДОЛЬНЫМИ РАССЛОЕНИЯМИ\*

Предлагается подход, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики балки с расслоениями, образовавшимися по нескольким участкам параллельно и на разных уровнях по отношению к нейтральному слою.

**Ключевые слова:** составной стержень, конструктивно нелинейные системы, связи сдвига, деградация связей сдвига, расслоение, трещинообразование, напряжение, деформация.

В работах [1-4] рассматривались статические и динамические задачи изгиба нагруженных балок, внезапно расслоившихся по всей длине по нейтральному слою. Было показано существенное (двухкратное и более) увеличение максимальных напряжений и деформаций при консольном и двухопорном опирании балок, нагруженных сосредоточенными и распределенными нагрузками. В настоящей работе предлагается подход, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики балки с расслоениями, образовавшимися по нескольким участкам параллельно и на разных уровнях по отношению к нейтральному слою (рис. 1).

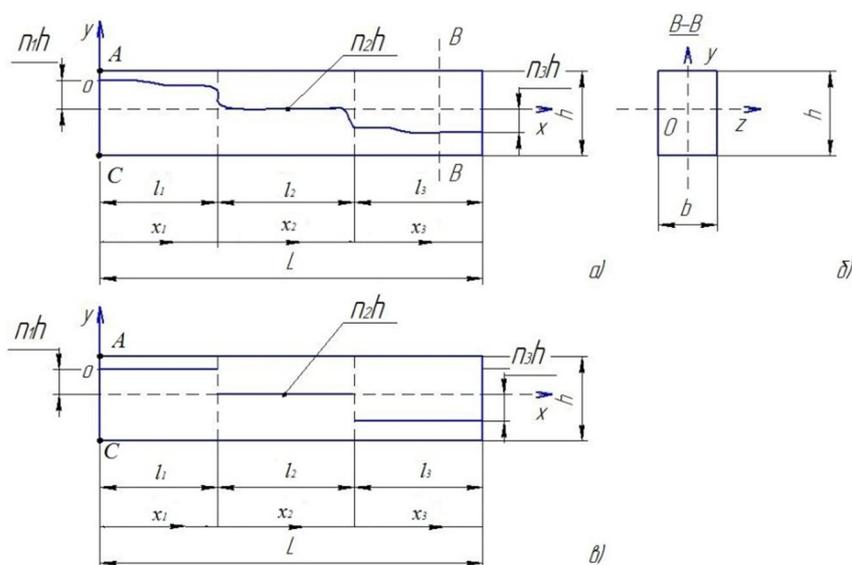


Рисунок 1 – Модель балки с трещиной: а – реальная трещина в балке; б – поперечное сечение балки; в – расчетная модель балки

Рассмотрим балку пролетом  $L$  прямоугольного поперечного сечения площадью  $A = bh$ , отнесенной к декартовой системе координат  $xuz$ , начало которой расположено в центре тяжести левого торца (рис. 1). Пусть балка на ряде участков  $l_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) расслоилась. Под продольным расслоением подразумевается разрушение по определенной поверхности связей сдвига между двумя частями балки.

Согласно расчетной схеме, балка моделируется сопряжением  $m$  сегментов  $\Omega_i = [C_i, -C_{i-1}]$ ,  $C_0 = 0$ ,  $C_m = L$  в виде составных (по А.Р. Ржаницыну) стержней длиной  $l_i$  с разрушенными связями сдвига и полностью сохранившимися поперечными связями. Вводятся

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №12-08-97587-р\_центр\_а).

$m$  локальных координат  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). Каждый цельный сегмент рассматривается как составной стержень, две части которого определенным образом соединены достаточно жестко, чтобы считать стержень цельным при расчете на рабочие нагрузки. Напряженное состояние каждой части считается известным, если определены значения изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил в произвольном поперечном сечении. Для цельной балки и ее частей считаются справедливыми гипотезы и допущения механической теории стержней Эйлера-Бернулли. Предполагается, что связи, соединяющие обе части балки, равномерно распределены вдоль стержня, а касательные напряжения  $\tau_{xy}$ , возникающие в слоях параллельных нейтральному, распределены равномерно по ширине  $b$  прямоугольного поперечного сечения:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Q(x)}{2I_z} \left( \frac{h^2}{4} - y_1^2 \right), \quad (1)$$

где  $Q = Q(x)$  – перерезывающая сила в сечении  $x$ ;  $I_z = \frac{bh^3}{12}$  – осевой момент инерции поперечного сечения цельной балки;  $y_1 = nh \left( n \in \left( -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) \right)$  – расстояние произвольного слоя от нейтрального.

Рассмотрим  $i$ -й сегмент составной балки длиной  $l_i$  с отсутствующими связями сдвига между верхней и нижней частями. На рисунке 2 показана интенсивность распределенной контактной нагрузки между двумя частями  $i$ -го сегмента балки, обусловленной поперечными связями между частями (обозначена  $p(x)$ ).

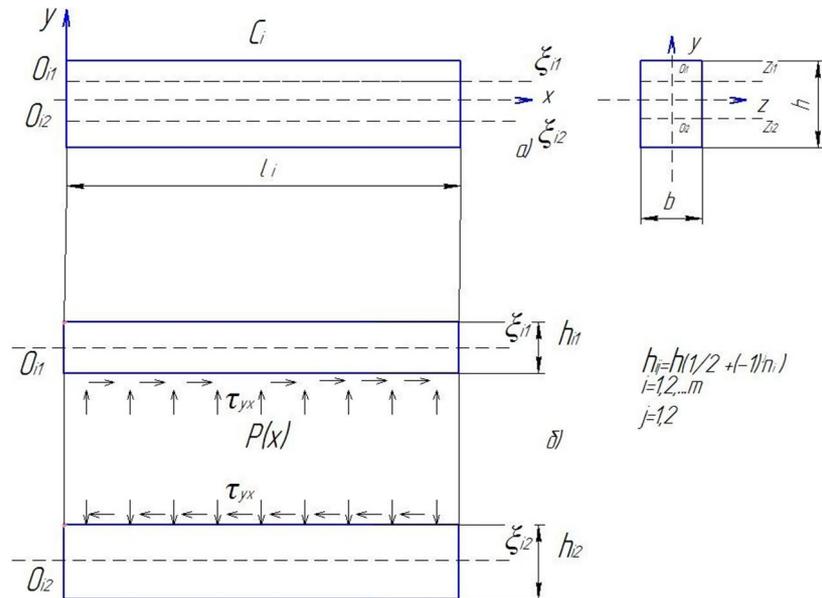


Рисунок 2 – Расчетная схема  $i$ -го сегмента балки:  
 а – цельная балка; б – две части балки, соединенные поперечными связями

Расстояние слоя, по которому произошло расслоение, от нейтрального слоя определяется параметром  $n$ , изменяющимся в пределах от  $-\frac{1}{2}$  до  $\frac{1}{2}$ . Высоты поперечных сечений верхней части (индекс  $j = 1$ ) и нижней ( $j = 2$ ) определяются формулой:

$$h_{ij} = h \left( \frac{1}{2} + (-1)^j n \right), \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (2)$$

Рассмотрим вначале однородные уравнения свободного движения частей  $i$ -го сегмента:

$$EI_{ij} \frac{\partial^4 w_{ij}}{\partial x_{ij}^4} + \rho b h_{ij} \frac{\partial^2 w_{ij}}{\partial t^2} = (-1)^j p(x), \quad (j = 1, 2), \quad (3)$$

где  $w_{ij} = w_{ij}(x_{ij}, t)$  – прогиб  $j$ -ой части  $i$ -го сегмента;  $\rho$  – погонная плотность материала

балки;  $I_{ij} = \frac{bh_{ij}^3}{12}$  – момент инерции поперечного сечения  $j$ -ой части  $i$ -го сегмента. Полагая

справедливым равенство прогибов частей балки-сегмента:

$$w_{i1}(x_i, t) = w_{i2}(x_i, t) = w_i(x_i, t), \quad (4)$$

сложим уравнения (3) и получим уравнение:

$$EI_i \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4} + \rho A \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

где  $I_i = I_{i1} + I_{i2} = I_0 \left( \frac{1}{4} + 3n_i^2 \right)$ ,  $I_0 = \frac{bh^3}{12}$ .

Введем безразмерные переменные и параметры  $\bar{w}_i = \frac{w_i}{L}$ ;  $\xi_i = \frac{x_i}{L}$ ;  $\tau = \omega_0 t$ ;  $\omega_0 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI_i}{\rho A}}$ ;

Тогда уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{\partial^4 \bar{w}_i}{\partial \xi_i^4} + r_i^4 \frac{\partial^2 \bar{w}_i}{\partial \tau^2} = 0, \quad (6)$$

где  $r_i^4 = \frac{I_0}{I_i} = \frac{1}{\frac{1}{4} + 3n_i^2}$ .

Полагая собственные колебания гармоническими, разделим переменные в уравнении (6) с помощью представления:

$$\bar{w}_i = W_i(\xi) e^{i\bar{\omega}\tau}, \quad (7)$$

где  $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}$  – безразмерная собственная частота изгибных колебаний (парциальная собственная частота  $i$ -го сегмента). Подставляя (7) в (6), получим дифференциальное уравнение для форм собственных изгибных колебаний  $i$ -го сегмента:

$$W_i^{IV} - k_i^4 W_i = 0, \quad \text{где } k_i = r_i k. \quad (8)$$

$$k^4 = \frac{\omega^2 \rho A L^4}{EI} \text{ – цельный стержень; } k = \sqrt{\frac{\omega}{R C}} \text{ – волновое число; } C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, R = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{I}{A}}.$$

Корнями дисперсионного уравнения являются числа  $k_i, -k_i, ik_i, -ik_i$ , общее решение уравнения (8) принимает вид:

$$W_i = D_{i1} \cos k_i \xi_i + D_{i2} \sin k_i \xi_i + D_{i3} \operatorname{ch} k_i \xi_i + D_{i4} \operatorname{sh} k_i \xi_i. \quad (9a)$$

Повороты поперечных сечений  $i$ -го сегмента:

$$\Theta_i = W_i' = k \left( -D_{i1} \sin k_i \xi_i + D_{i2} \cos k_i \xi_i + D_{i3} \operatorname{sh} k_i \xi_i + D_{i4} \operatorname{ch} k_i \xi_i \right). \quad (9b)$$

Изгибающий момент на  $i$ -ом сегменте:

$$\frac{M_i}{EI_i} = W_i'' = k^2 \left( -D_{i1} \cos k_i \xi_i - D_{i2} \sin k_i \xi_i + D_{i3} \operatorname{ch} k_i \xi_i + D_{i4} \operatorname{sh} k_i \xi_i \right). \quad (9b)$$

Поперечная сила на  $i$ -ом сегменте:

$$\frac{Q_i}{EI_i} = W_i''' = k^3 \left( D_{i1} \sin k_i \xi_i - D_{i2} \cos k_i \xi_i + D_{i3} \operatorname{sh} k_i \xi_i + D_{i4} \operatorname{ch} k_i \xi_i \right). \quad (9b)$$

Запишем зависимость (9) в матричной форме, введя следующие векторы и матрицы:

$\bar{Y}_i = (W_i, W'_i, W''_i, W'''_i)^T$  – вектор состояния в произвольном сечении  $\xi$ ;  $\bar{D}_i = (D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}, D_{i4})^T$  – вектор постоянных интегрирования, матрица  $U_i$ :

$$U_i(\xi_i, \omega) = \begin{pmatrix} -\cos k_i \xi_i & \sin k_i \xi_i & ch k_i \xi_i & sh k_i \xi_i \\ -k_i \sin k_i \xi_i & k_i \cos k_i \xi_i & k_i sh k_i \xi_i & k_i ch k_i \xi_i \\ -k_i^2 \cos k_i \xi_i & -k_i^2 \sin k_i \xi_i & k_i^2 ch k_i \xi_i & k_i^2 sh k_i \xi_i \\ k_i^3 \sin k_i \xi_i & -k_i^3 \cos k_i \xi_i & k_i^3 sh k_i \xi_i & k_i^3 ch k_i \xi_i \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$\bar{Y}_i = U_i(\xi_i, \omega) \bar{D}_i. \tag{10}$$

Обозначим  $\bar{Y}_{i0}$  вектор состояния в начале балки. Выразим его через начальные параметры  $\bar{Y}_{i0} = (W_{i0}, W'_{i0}, W''_{i0}, W'''_{i0})$ . Тогда постоянные интегрирования  $D_{in}$  ( $n=1 \div 4$ ) выражаются через начальные параметры. Из уравнения (10) следует при  $\xi = 0$ :

$$Y_{i0} = B_i \bar{D}_i, \tag{11}$$

где  $B$  – невырожденная ( $\det B = 4k^6$ ) матрица  $B_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k_i & 0 & k_i \\ -k_i^2 & 0 & k_i^2 & 0 \\ 0 & -k_i^3 & 0 & k_i^3 \end{pmatrix}$ , имеющая обратную:

$$B_i^{-1} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{k_i^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_i} & 0 & -\frac{1}{k_i^3} \\ 1 & 0 & \frac{1}{k_i^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_i} & 0 & \frac{1}{k_i^3} \end{pmatrix}$$

Умножая уравнение (11) на матрицу  $B_i^{-1}$  слева, получим:

$$\bar{D}_i = B_i^{-1} \bar{Y}_{i0}. \tag{12}$$

и подставляя (12) в (10), выразим вектор состояния  $\bar{Y}_i$  через начальные параметры  $\bar{Y}_{i0}$  посредством матрицы влияния  $V_i(\xi_i)$ :

$$\bar{Y}_i = V_i(\xi_i) \bar{Y}_{i0}, \tag{13}$$

где матрица  $V_i(\xi_i)$  имеет вид:

$$V_i(\xi_i) = \begin{pmatrix} K_4(k_i \xi_i) & K_3(k_i \xi_i) & K_2(k_i \xi_i) & K_1(k_i \xi_i) \\ K_i^4 K_1(k_i \xi_i) & K_i^4 K_2(k_i \xi_i) & K_i^4 K_3(k_i \xi_i) & K_i^4 K_4(k_i \xi_i) \\ K_i^4 K_2(k_i \xi_i) & K_i^4 K_1(k_i \xi_i) & K_i^4 K_4(k_i \xi_i) & K_i^4 K_3(k_i \xi_i) \\ K_i^4 K_3(k_i \xi_i) & K_i^4 K_2(k_i \xi_i) & K_i^4 K_1(k_i \xi_i) & K_i^4 K_4(k_i \xi_i) \end{pmatrix},$$

где  $K_j(k\xi)$  ( $j=1 \div 4$ ) – функции Крылова.

$$K_{1i} = \frac{sh k_i \xi_i - \sin k_i \xi_i}{2k_i^3}, K_{2i} = \frac{ch k_i \xi_i - \cos k_i \xi_i}{2k_i^2}, K_{3i} = \frac{sh k_i \xi_i + \sin k_i \xi_i}{2k_i}, K_{4i} = \frac{ch k_i \xi_i + \cos k_i \xi_i}{2}.$$

Запишем вектор состояния для конца  $i$ -го сегмента при  $\xi_i = \bar{l}_i$ .

$$\bar{Y}_{i\bar{l}_i} = V(\eta_i) \bar{Y}_{i0}. \tag{14}$$

Здесь  $V(\eta_i)$  – матрица влияния начального сечения  $\xi = 0$  на концевое сечение  $i$ -го сегмента,  $\eta_i = k_i \bar{l}_i$ , где  $\bar{l}_i = \frac{l_i}{L}$ . Условия сопряжения двух соседних ( $i$ -го и  $i+1$ ) сегментов имеют вид:

$$\begin{aligned} W_i(\bar{l}_i) &= W_{i+1}(0). \\ W_i'(\bar{l}_i) &= W_{i+1}'(0). \\ I_1 W_i(\bar{l}_i) &= I_2 W_{i+1}''(0); \quad I_1 W_i'(\bar{l}_i) = I_2 W_{i+1}'''(0). \end{aligned} \quad (15)$$

Для двух сегментов  $\Omega_1$  и  $\Omega_m$  формулируются дополнительные ограничения. Например, для балки, левый конец которой зашпелен, а правый шарнирно оперт, накладываются условия:

$$W_1(0) = W_1'(0) = W_m(\bar{l}_m) = W_m''(\bar{l}_m) = 0. \quad (16)$$

Уравнения (15) сопряжения сегментов ( $i$ -го и  $i+1$ ) можно представить в матричной форме  $T_i \bar{Y}_{i0} = T_{i+1} \bar{Y}_{i+10}$ , где:

$$T_i = \begin{pmatrix} K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) & K_2(\eta_i) & K_1(\eta_i) \\ K_i^4 K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) & K_2(\eta_i) \\ K_i^4 K_2(\eta_i) & K_i^4 K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) \\ K_i^4 K_3(\eta_i) & K_i^4 K_2(\eta_i) & K_i^4 K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) \end{pmatrix} = V(\eta_i)$$

$T_{i+1} = E$ , т.е.  $V_{i_i}$  – вектор состояния для конца  $i$ -го сегмента является вектором начальных параметров для  $(i+1)$ -го сегмента:

$$\bar{Y}_{i_i} = \bar{Y}_{i+10} = V(\eta_i) \bar{Y}_{i0}. \quad (17)$$

Соотношение (17) дает связь между константами (начальными параметрами)  $(i+1)$ -го и  $i$ -го сегментов. Вектор состояния в конце  $m$ -го сегмента, т.е. в конце стержня  $\xi_m = \bar{l}_m$ :

$$\bar{Y}_{m\bar{l}_m} = V(\eta_m) \bar{Y}_{m0} = V(\eta_m) V(\eta_{m-1}) \dots V(\eta_1) \bar{Y}_{10} = S_{m\bar{l}_m} \bar{Y}_{10}, \text{ где } S_{m\bar{l}_m} = \prod_{i=1}^m V(\eta_i) \text{ – матрица влияния начального сечения на конечное } \xi_i = 0, \xi_m = \bar{l}_m.$$

Представим вектор состояния совокупностью блоков:

- 1)  $\bar{Y}^{(C)}$  – включает кинематические составляющие  $\bar{Y}^{(C)} = (W, W')$ ;
- 2)  $\bar{Y}^{(F)}$  – включает силовые параметры  $\bar{Y}^{(F)} = (W'', W''')$ .

Тогда матрица влияния начального узла (сечения) на конечный становится клеточной, включающей 4 блока размером  $4 \times 4$ .

$$Y_{m\bar{l}_m} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(C)} \\ \bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(F)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{m\bar{l}_m}^{(CC)} & S_{m\bar{l}_m}^{(CF)} \\ S_{m\bar{l}_m}^{(FC)} & S_{m\bar{l}_m}^{(FF)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{Y}_{10}^{(C)} \\ \bar{Y}_{10}^{(F)} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где обозначено  $\bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(C)} = \begin{pmatrix} W_{m\bar{l}_m} \\ W'_{m\bar{l}_m} \end{pmatrix}$ ,  $\bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(F)} = \begin{pmatrix} W''_{m\bar{l}_m} \\ W'''_{m\bar{l}_m} \end{pmatrix}$ ,  $\bar{Y}_{10}^{(C)} = \begin{pmatrix} W_{10} \\ W'_{10} \end{pmatrix}$ ,  $\bar{Y}_{10}^{(F)} = \begin{pmatrix} W''_{10} \\ W'''_{10} \end{pmatrix}$ ,  $S^{(CC)} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$ ,

$S^{(CF)} = \begin{pmatrix} S_{13} & S_{14} \\ S_{23} & S_{24} \end{pmatrix}$ ,  $S^{(FC)} = \begin{pmatrix} S_{31} & S_{32} \\ S_{41} & S_{42} \end{pmatrix}$ ,  $S^{(FF)} = \begin{pmatrix} S_{33} & S_{34} \\ S_{43} & S_{44} \end{pmatrix}$ . Здесь  $S_{pq}$  – элементы матрицы

$S_{n\bar{l}_n} = \prod_{i=1}^n V(\eta_i)$ ,  $p, q = 1, 2, 3, 4$ ;  $p$  – количество строк в матрице;  $q$  – количество столбцов в матрице  $S_{m\bar{l}_m}$ .

Характеристики начального сечения выражаются через кинематические характеристики концевое сечения:

$$\bar{Y}_{10}^{(F)} = \left[ S^{(CF)} \right]^{-1} \left( \bar{Y}_{10}^{(C)} - S^{(CC)} \bar{Y}_{10}^{(C)} \right). \quad (19)$$

Введем вектор перемещений концевых сечений (начального  $\xi_1 = 0$  и конечного  $\xi_m = \bar{l}_m$ )  $\bar{U} = (W_{10} \ W_{10}'' \ W_{m\bar{l}_m} \ W_{m\bar{l}_m}'')$  и вектор сил (включая моменты)  $\bar{F} = (W_{10} \ W_{10}'' \ W_{m\bar{l}_m} \ W_{m\bar{l}_m}'')$ . Связь между ними находим, используя соотношения (18) и (19):

$$\bar{F}(\omega) = K(\omega)U(\omega). \quad (20)$$

Из второго уравнения (18) с учетом (19) находим:

$$\bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(F)} = (S^{(FC)} - S^{(FF)}[S^{(CF)}]^{-1}S^{(CC)})\bar{Y}_{10}^{(C)} + S^{(FF)}[S^{(CF)}]^{-1}\bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(C)}. \quad (21)$$

Объединяя (19) и (21), получим:

$$\begin{pmatrix} \bar{Y}_{10}^{(F)} \\ \bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(F)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[S^{(CF)}]^{-1}S^{(CC)} & [S^{(CF)}]^{-1} \\ S^{(FC)} - S^{(FF)}[S^{(CF)}]^{-1}S^{(CC)} & S^{(FF)}[S^{(CF)}]^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{Y}_{10}^{(C)} \\ \bar{Y}_{m\bar{l}_m}^{(C)} \end{pmatrix} \text{ или в развернутом виде:}$$

$$\begin{pmatrix} W_{10}'' \\ W_{10}'''' \\ W_{m\bar{l}_m}'' \\ W_{m\bar{l}_m}'''' \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_{10} \\ W_{10}'' \\ W_{m\bar{l}_m} \\ W_{m\bar{l}_m}'' \end{pmatrix}, \text{ где } [S^{(CF)}]^{-1} = \frac{1}{S_{13}S_{24} - S_{14}S_{23}} \begin{pmatrix} S_{24} & -S_{14} \\ -S_{23} & S_{13} \end{pmatrix} = T.$$

Обозначим  $a_{11} = (S_{13}S_{24} - S_{14}S_{23})S_{31} + (S_{23}S_{34} - S_{24}S_{33})S_{11} + (S_{14}S_{33} - S_{13}S_{34})S_{21}$ ;

$a_{12} = (S_{13}S_{24} - S_{14}S_{23})S_{32} + (S_{23}S_{34} - S_{24}S_{33})S_{12} + (S_{14}S_{33} - S_{13}S_{34})S_{22}$ ;

$a_{21} = (S_{13}S_{24} - S_{14}S_{23})S_{41} + (S_{23}S_{44} - S_{24}S_{43})S_{11} + (S_{14}S_{43} - S_{13}S_{44})S_{21}$ ;

$a_{22} = (S_{13}S_{24} - S_{14}S_{23})S_{42} + (S_{23}S_{44} - S_{24}S_{43})S_{21} + (S_{14}S_{43} - S_{13}S_{44})S_{22}$ .

$\Delta = S_{13}S_{24} - S_{14}S_{23}$ , тогда блочная матрица  $T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}$  раскрывается следующим образом:

$$T_{11} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix},$$

где  $b_{11} = S_{14}S_{21} - S_{11}S_{24}$ ;  $b_{12} = S_{14}S_{22} - S_{12}S_{24}$ ;  $b_{21} = S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}$ ;  $b_{22} = S_{12}S_{22} - S_{13}S_{22}$ ;

$$T_{12} = \begin{pmatrix} S_{24} & -S_{14} \\ -S_{23} & S_{13} \end{pmatrix}; T_{21} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; T_{22} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix},$$

где  $c_{11} = S_{24}S_{33} - S_{23}S_{34}$ ;  $c_{12} = S_{13}S_{34} - S_{14}S_{33}$ ;  $c_{21} = S_{24}S_{43} - S_{23}S_{44}$ ;  $c_{22} = S_{13}S_{44} - S_{14}S_{43}$ ;

$$T = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & S_{24} & -S_{14} \\ b_{21} & b_{22} & -S_{23} & S_{13} \\ a_{11} & a_{12} & c_{11} & c_{12} \\ a_{21} & a_{22} & c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}.$$

Приравняв нулю определитель матрицы  $T$ , получим частотное уравнение для балки, изображенной на рисунке 1, состоящей из  $m$  участков с продольными расслоениями:

$$|T| = 0. \quad (22)$$

В работе [5] были получены частоты изгибных колебаний с использованием формулы (22).

При внезапно образующемся расслоении возникает динамический процесс, в ходе которого напряжения и деформации могут достигнуть недопустимо высоких значений. Движение  $i$ -го сегмента балки описывается дифференциальным уравнением изгибных колебаний:

$$\frac{\partial^4 \bar{w}_i}{\partial \xi^4} + r_i^4 \frac{\partial^2 \bar{w}_i}{\partial \tau^2} = -\bar{q}_i, \quad (23)$$

где  $\bar{q}_i = \frac{qL^3}{EI_i}$ ;  $I_i = I_{i1} + I_{i2} = I_0 \left( \frac{1}{4} + 3n_i^2 \right)$ ;  $I_0 = \frac{bh^3}{12}$ ;  $L = l_1 + l_2 + \dots = \sum_{i=1}^m l_i$ ,  $m$  – число сегментов.

Уравнение (23) должно удовлетворять граничным условиям (16). Решение уравнения (23) для каждого сегмента ищем в виде:

$$\bar{w}_i = \sum_{\alpha=1}^{\infty} Q_{i\alpha}(\tau) W_{i\alpha}(\xi), \quad (24)$$

где  $\alpha$  – номер формы колебаний с частотой  $\alpha$  ( $\alpha = 1, 2, \dots, \infty$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ );  $W_{i\alpha}$  – форма собственных изгибных колебаний  $i$ -го сегмента по  $\alpha$  частоте ( $W_{11}$  – основная форма собственных изгибных колебаний 1-го сегмента,  $W_{12}$  – вторая форма собственных изгибных колебаний 1-го сегмента).

Подставляя (24) в (23), учитывая равенство  $W_i^{IV} = k_i^4 W_i$ ,  $k_i = k r_i$  и учитывая ортогональность форм собственных колебаний, получим для определения функций  $Q_{i\alpha}(\tau)$  дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 Q_{i\alpha}}{d\tau^2} + k^4 Q_{i\alpha} = R_{i\alpha}, \quad (25)$$

где обозначено  $R_{i\alpha} = \frac{-\int_0^{\bar{l}_i} \bar{q}_i \left( \frac{1}{4} + 3n_i^2 \right) W_{i\alpha} d\xi}{\int_0^{\bar{l}_i} W_{i\alpha}^2 d\xi}$ ;  $\bar{l}_i = \frac{l_i}{L}$ .

Общее решение неоднородного уравнения (25) находим методом вариации произвольных постоянных:

$$Q_{i\alpha}(\tau) = C_{1i\alpha} \sin k_\alpha^2 \tau + C_{2i\alpha} \cos k_\alpha^2 \tau + \frac{R_{i\alpha}}{k_\alpha^4}, \quad (26)$$

где  $C_{ji\alpha}$  ( $j = 1, 2; i = 1, 2, \dots, m$ ) – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий.

Подставляя функцию (26) в (24), получим функцию прогиба  $i$ -го сегмента балки в ходе динамического процесса, вызванного внезапно образовавшимся расслоением:

$$\bar{w}_i = \sum_{\alpha=1}^{\infty} (C_{1i\alpha} \sin k_\alpha^2 \tau + C_{2i\alpha} \cos k_\alpha^2 \tau) W_{i\alpha}(\xi). \quad (27)$$

Рассмотрим балку, состоящую из трех внезапно расслоившихся сегментов. Найдем для них формы собственных изгибных колебаний  $W_{i\alpha}$ , используя соотношение для вектора состояния на  $i$ -ом сегменте (13).

В развернутом виде:

$$\begin{pmatrix} W_i(\xi_i) \\ W_i'(\xi_i) \\ W_i''(\xi_i) \\ W_i'''(\xi_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_4(k_i \xi_i) & K_3 & K_2 & K_1 \\ k_i^4 K_1(k_i \xi_i) & K_4 & K_3 & K_2 \\ k_i^4 K_2(k_i \xi_i) & k_i^4 K_1 & K_4 & K_3 \\ k_i^4 K_3(k_i \xi_i) & k_i^4 K_2 & k_i^4 K_1 & K_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_{i0} \\ W_{i0}' \\ W_{i0}'' \\ W_{i0}''' \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Связь между начальными параметрами соседних сегментов выражается соотношением (17). Тогда вектор состояния на первом сегменте  $\bar{Y}_1(\xi_1) = V_1(k_1 \xi_1) \bar{Y}_{10}$ ; на втором сегменте  $\bar{Y}_2(\xi_2) = V_2(k_2 \xi_2) V(\eta_1) \bar{Y}_{10}$ ,  $\eta_1 = k_1 \bar{l}_1$ ; на третьем сегменте  $\bar{Y}_3(\xi_3) = V_3(k_3 \xi_3) V(\eta_2) V(\eta_1) \bar{Y}_{10}$ ,  $\eta_2 = k_2 \bar{l}_2$ .

Обозначим произведения функциональных и числовых матриц следующим образом:

$$V_1(k_1 \xi_1) = \Phi_1(\xi_1); V_2(k_2 \xi_2) V(\eta_1) = \Phi_2(\xi_2); V_3(k_3 \xi_3) V(\eta_2) V(\eta_1) = \Phi_3(\xi_3).$$

Элементы этих матриц обозначим следующим образом:

$$\Phi_1(\xi_1) = \begin{pmatrix} \varphi_{11}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{12}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{13}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{14}^1(k_1 \xi_1) \\ \varphi_{21}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{22}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{23}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{24}^1(k_1 \xi_1) \\ \varphi_{31}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{32}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{33}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{34}^1(k_1 \xi_1) \\ \varphi_{41}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{42}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{43}^1(k_1 \xi_1) & \varphi_{44}^1(k_1 \xi_1) \end{pmatrix},$$

т.е.  $\varphi_{11}^1(k_1\xi_1) = K_4(k_1\xi_1)$ ;  $\varphi_{12}^1(k_1\xi_1) = K_3(k_1\xi_1)$ ;

$$\Phi_2(\xi_2) = \begin{pmatrix} \varphi_{11}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{12}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{13}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{14}^2(k_2\xi_2) \\ \varphi_{21}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{22}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{23}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{24}^2(k_2\xi_2) \\ \varphi_{31}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{32}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{33}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{34}^2(k_2\xi_2) \\ \varphi_{41}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{42}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{43}^2(k_2\xi_2) & \varphi_{44}^2(k_2\xi_2) \end{pmatrix};$$

$$\Phi_3(\xi_3) = \begin{pmatrix} \varphi_{11}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{12}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{13}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{14}^3(k_3\xi_3) \\ \varphi_{21}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{22}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{23}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{24}^3(k_3\xi_3) \\ \varphi_{31}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{32}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{33}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{34}^3(k_3\xi_3) \\ \varphi_{41}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{42}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{43}^3(k_3\xi_3) & \varphi_{44}^3(k_3\xi_3) \end{pmatrix}.$$

Тогда формы собственных изгибных колебаний для каждого из трех сегментов балки имеют вид

$$\begin{aligned} W_{1\alpha} &= \varphi_{13}^1(k_\alpha\xi_1)W_0'' + \varphi_{14}^1(k_\alpha\xi_1)W_0'''; \\ W_{2\alpha} &= \varphi_{13}^2(k_\alpha\xi_2)W_0'' + \varphi_{14}^2(k_\alpha\xi_2)W_0'''; \\ W_{3\alpha} &= \varphi_{13}^3(k_\alpha\xi_3)W_0'' + \varphi_{14}^3(k_\alpha\xi_3)W_0'''. \end{aligned} \quad (29)$$

Выразим  $W_0''$  и  $W_0'''$ , учитывая, что  $W_{3\alpha} = 0$  при  $\xi_3 = \bar{l}_3$ , тогда получим:

$$\varphi_{13}^3(k_\alpha\xi_3)W_0'' + \varphi_{14}^3(k_\alpha\xi_3)W_0''' = 0,$$

отсюда  $W_0''' = -\frac{\varphi_{13}^3(k_\alpha\bar{l}_3)}{\varphi_{14}^3(k_\alpha\bar{l}_3)}W_0''$ . Значит,  $W_{1\alpha} = W'' \left[ \varphi_{13}^1(k_\alpha\xi_1) + \frac{\varphi_{13}^3(k_\alpha\bar{l}_3)}{\varphi_{14}^3(k_\alpha\bar{l}_3)}\varphi_{14}^1(k_\alpha\xi_1) \right]$ .

Найдем постоянные интегрирования  $C_{jia}$  ( $j = 1, 2; i = 1, 2 \dots m$ ) из начальных условий для

балки (см. рис. 1). Из начального условия  $\bar{w}(\xi, 0) = \bar{w}_{cm}$  или  $\sum_{\alpha=1}^{\infty} C_{2i\alpha} W_{i\alpha}(\xi) = w_{cm}(\xi)$  следует:

$$C_{2i\alpha} = \frac{\int_{\bar{l}_i}^{\bar{l}_{i+1}} w_{cm}(\xi) W_{i\alpha}(\xi) d\xi}{\int_{\bar{l}_i}^{\bar{l}_{i+1}} W_{i\alpha}^2(\xi) d\xi}.$$

Из начального условия  $\left. \frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} \right|_{\xi, 0} = 0$  следует  $C_{1i\alpha} = 0$ .

Теперь функция прогибов (27) принимает вид:

$$\bar{w}_i = \sum_{\alpha=1}^{\infty} C_{2i\alpha} \cos k_\alpha^2 \tau W_{i\alpha}(\xi). \quad (30)$$

Дважды дифференцируя функцию прогибов по  $\xi$ , получим функцию безразмерных из-

гибающих моментов (по сегментам)  $\frac{\partial^2 w_i}{\partial \xi^2} = \sum_{\alpha=1}^{\infty} C_{2i\alpha} \cos k_\alpha^2 \tau W_{i\alpha}''(\xi)$ .

Напряжение в произвольном сечении  $\xi$  в произвольный момент времени  $\tau$  определя-

ется из зависимости  $\bar{\sigma}(\xi, \tau, \bar{y}) = \bar{y} \frac{\partial^2 \bar{w}_i}{\partial \xi^2}$ .

Сравним наибольшие напряжения в исходном (неповрежденном) состоянии с наибольшими динамическими напряжениями в балке, состоящей из трех сегментов  $m = 3$  с продольными расслоениями на уровнях  $(n_1 = 0, 4)$ ,  $(n_2 = 0)$ ,  $(n_3 = -0, 4)$  при одинаковых длинах этих участков в характерных точках  $A$  и  $C$  (см. рис. 1).

На рисунке 4 показаны графики безразмерных нормальных динамических напряжений в характерных точках в балке, состоящей из трех участков ( $m = 3$ ) с продольными расслоениями на уровнях  $(n_1 = 0, 4)$ ,  $(n_2 = 0)$ ,  $(n_3 = -0, 4)$ .

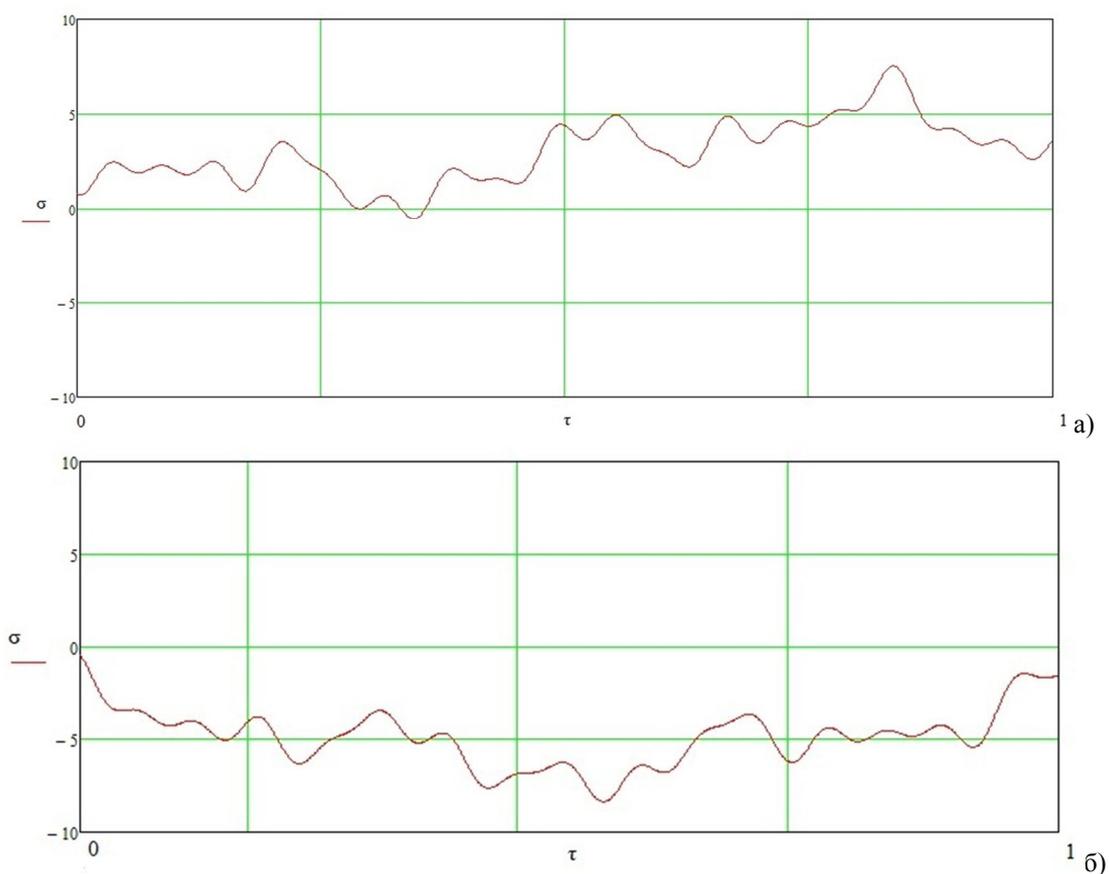


Рисунок 4 – Графики динамических напряжений в характерных точках балки, состоящей из трех сегментов с продольными расслоениями на уровнях  $(n_1 = 0,4)$ ,  $(n_2 = 0)$ ,  $(n_3 = -0,4)$ : а – в точке А; б – в точке С

Наибольшее растягивающее напряжение в цельной балке развивается в точке А ( $\xi = 0$ ) и имеет величину  $\bar{\sigma}_{\text{стат}}^{\oplus} = 0,75$ . Наибольшее сжимающее напряжение в цельной балке также развивается в заделке в точке С ( $\xi = 0$ ) и имеет величину  $\sigma_{\text{стат}}^{-} = \sigma\left(0, -\frac{h_1}{2}\right) = -0,75$ .

Эффект внезапного расслоения балки оценивается безразмерными коэффициентами  $K_{\text{дин}}^{\oplus}$  и  $K_{\text{дин}}^{-}$ , показывающими превышение напряжений в динамике соответствующих величин в рабочем статическом состоянии. Наибольшее растягивающее напряжение при динамическом расслоении развивается в точке А ( $\xi = 0$ ) в момент времени  $\tau^* = 0,78$  и превосходит растяжения цельной балки в 9,8 раза.

$$K_{A_{\text{дин}}}^{\oplus} = \frac{|\bar{\sigma}_{\text{дин}}^{\oplus} (0)|}{|\bar{\sigma}_{\text{стат}}^{\oplus} (0)|} = \frac{7,4}{0,75} = 9,8.$$

Наибольшее сжимающее напряжение при динамическом расслоении в точке С ( $\xi = 0$ ) развивается в момент времени  $\tau^* = 0,62$  и превосходит сжатие цельной балки в 10,1 раза.

$$K_{C_{\text{дин}}}^{-} = \frac{|\bar{\sigma}_{\text{дин}}^{-} (0)|}{|\bar{\sigma}_{\text{стат}}^{-} (0)|} = \frac{7,6}{0,75} = 10,1.$$

Таким образом, анализируя численные результаты, отметим:

– динамические приращения напряжений при внезапном расслоении, образующиеся по нескольким участкам параллельно и на разных уровнях по отношению к нейтральному слою, значительные. Они зависят как от длины расслоившегося участка, так и от уровня.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордон, В.А. Перераспределение напряжений в нагруженной составной балке при деградации связей сдвига [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2010. – №4. – С. 2-6.
2. Гордон, В.А. Влияние продольного расслоения составного стержня на частоты собственных изгибных колебаний [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2011. – №1. – С. 19-24.
3. Павлова, Т.А. Развитие метода расчета строительных конструкций на живучесть при внезапных структурных изменениях [Текст] дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.17. – Орел, 2006. – 175 с.
4. Гордон, В.А. Влияние прогрессирующего расслоения на напряженное состояние составного стержня [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Вестник отделения строительных наук РААСН, Вып. 5. – М.: 2011. – С. 60-64.
5. Гордон, В.А. Влияние продольных расслоений на спектр частот изгибных колебаний балки [Текст] / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Всеукраинский научно-технический журнал «Вибрации в технике и технологиях». – 2012. – №2. – С. 21-25.

#### **Гордон Владимир Александрович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»  
Тел.: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: gordon@ostu.ru

#### **Кравцова Эльвира Александровна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Старший преподаватель  
Тел.: +7 (4862) 41-98-48

---

V.A. GORDON, E.A. KRAVTSOVA

### **DYNAMIC DOGRUZHENIYA IN BEAMS WITH MULTILEVEL LONGITUDINAL BUNDLES**

*The article suggests the approach for assessing the stress-strain state and dynamic characteristics of the beam with bundles formed in several areas simultaneously and at different levels with respect to the neutral layer.*

**Keywords:** *compound rods, structurally nonlinear systems, connection of shift, degradation of the connections of shift, stratification, crack formation, stress, strain.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Gordon, V.A. Pereraspredelenie naprjazhenij v nagruzhennoj sostavnoj balke pri degradacii svjazej sdviga [Tekst] / V.A. Gordon, Je.A. Kravcova // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2010. – №4. – S. 2-6.
2. Gordon, V.A. Vlijanie prodol'nogo rassloenija sostavnogo sterzhnja na chastoty sobstvennyh izgibnyh kolebanij [Tekst] / V.A. Gordon, Je.A. Kravcova // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2011. – №1. – S. 19-24.

3. Pavlova, T.A. Razvitie metoda rascheta stroitel'nyh konstrukcij na zhivuchest' pri vnezapnyh struk-turnyh izmenenijah [Tekst] diss. ... kand. tehn. nauk: 05.23.17. – Orel, 2006. – 175 s.
4. Gordon, V.A. Vlijanie progressirujushhego rassloenija na naprjazhennoe sostojanie sostavnogo sterzhnja [Tekst] / V.A. Gordon, Je.A. Kravcova // Vestnik otdelenija stroitel'nyh nauk RAASN, Vyp. 5. – M.: 2011. – S. 60-64.
5. Gordon, V.A. Vlijanie prodol'nyh rassloenij na spektr chastot izgibnyh kolebanij balki [Tekst] / V.A. Gordon, Je.A. Kravcova // Vseukrainskij nauchno-tehnicheskij zhurnal «Vibracii v tehnike i tehnologijah». – 2012. – №2. – S. 21-25.

**Gordon Vladimir Aleksandrovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical sciences, professor, head of department «Higher mathematics»  
Ph.: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: gordon@ostu.ru

**Kravtsova Elvira Aleksandrovna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Senior lecturer  
Ph.: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: gordon@ostu.ru

КОЛЧУНОВ В.И., ПРАСОЛОВ Н.О., КОЖАРИНОВА Л.В.,  
ВЕТРОВА О.А.

## К АЛГОРИТМИЗАЦИИ ЗАДАЧ РАСЧЕТА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ

*Рассмотрен вопрос алгоритмизации задач расчета по определению параметров живучести железобетонных конструктивных систем при потере устойчивости отдельных элементов. В основу алгоритма положен полуаналитический метод перемещений с использованием шагово-итерационной процедуры для раскрытия физической нелинейности. Приведены результаты расчета живучести конструктивной системы железобетонного каркаса реконструируемого здания.*

**Ключевые слова:** алгоритм расчета, живучесть, конструктивная система, запроектное воздействие, потеря устойчивости.

В работе [1] приведена методика и результаты испытания железобетонных физических моделей конструкций двухпролетных рам при загрузении ригелей заданным уровнем проектной нагрузки и запроектным воздействием в виде внезапного выключения связевого элемента крайней стойки. Испытания железобетонных рам были выполнены в два этапа. На первом этапе испытана рама с раскрепленной связевым элементом крайней стойкой. Второй этап испытаний выполнен аналогично, но с тем лишь отличием, что связевой элемент, раскрепляющий крайнюю стойку, отсутствовал.

В ходе экспериментальных исследований были испытаны две серии конструктивных систем двухпролетных рам, каждая из которых состояла из двух сборных ригелей РЛ-1 и РП-1 сечением  $120 \times 40$  мм и длиной 1200 мм, крайней левой стойки С-1 сечением  $20 \times 30$  мм и стоек С-2, С-3 сечением  $120 \times 40$  мм (рис. 1). Все стойки рамы были выполнены длиной 700 мм. Ригели и стойки были объединены закладными деталями, с замоноличиванием стыков в двухпролетную сборно-монолитную рамно-стержневую конструктивную систему. Крайняя стойка рамы раскреплена связевым элементом РЭ-1, выполненным из уголков сечением  $20 \times 20 \times 3$  мм. Связевой элемент соединен с крайней стойкой с помощью закладной детали ЗД-1, фасонки Ф-1 и Ф-2 и бетонной шпонки БШ1 ( $\varnothing 8$  мм).

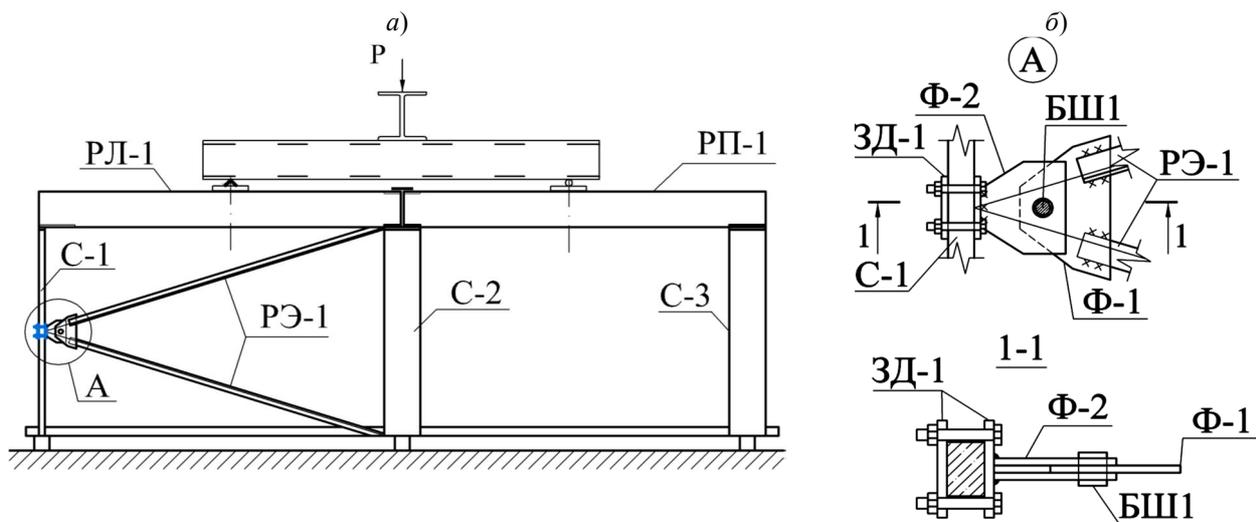


Рисунок 1 – Схема конструкции опытной рамы (а) и узлы соединения связевого элемента РЭ-1 с крайней стойкой (б)

Расчет опытных конструкций рам (рис. 2) был выполнен в двух вариантах: 1) численным методом с использованием программного комплекса SCAD [2]; 2) полустатическим ме-

тодом перемещений с использованием шагово-итерационной процедуры для раскрытия физической нелинейности по методике, изложенной в [3, 4]. Деформационный расчет рассматриваемой конструктивной системы для обоих вариантов выполнен с учетом ее динамического догружения. При этом для учета влияния податливости сопряжения ригеля и крайней стойки проведен расчет системы с нераскрепленной крайней стойкой при жестком, шарнирном и податливом ее соединении с ригелем. В результате такого расчета определено расчетное значение коэффициента  $k_1$ , учитывающего появившуюся в результате образования трещин податливость сопряжения стойки и ригеля рамы. Расчет по второму варианту позволил определить критические параметры, характеризующие потерю устойчивости системы при запроектом воздействии.

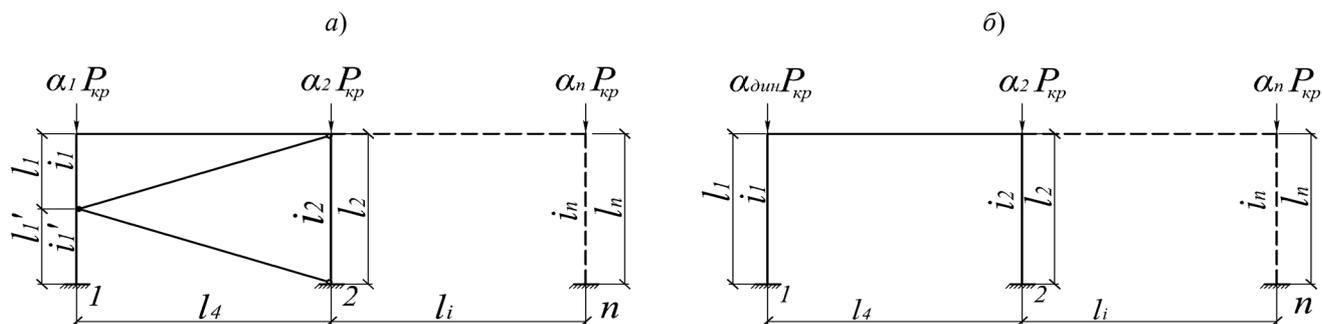


Рисунок 2 – Расчетная схема исходной нагруженной системы рамы (а) и системы после запроектного воздействия (б)

Полученные в результате экспериментальных исследований опытные данные, а также результаты их сопоставления с расчетными по обоим вариантам расчета позволили сделать вывод об эффективности методики расчета живучести железобетонных рамно-стержневых систем при потере устойчивости отдельного элемента [3, 4] с учетом изменения жесткости железобетонных элементов вследствие трещинообразования, взаимного влияния соседних элементов и податливости их сопряжения. Эти исследования позволили также количественно и качественно оценить динамический эффект, возникающий в железобетонных рамах при внезапном изменении расчетной схемы от запроектного воздействия.

Выполненные исследования послужили основой разработки алгоритма расчета живучести железобетонных рамно-стержневых систем при потере устойчивости одного из несущих элементов от внезапного запроектного воздействия.

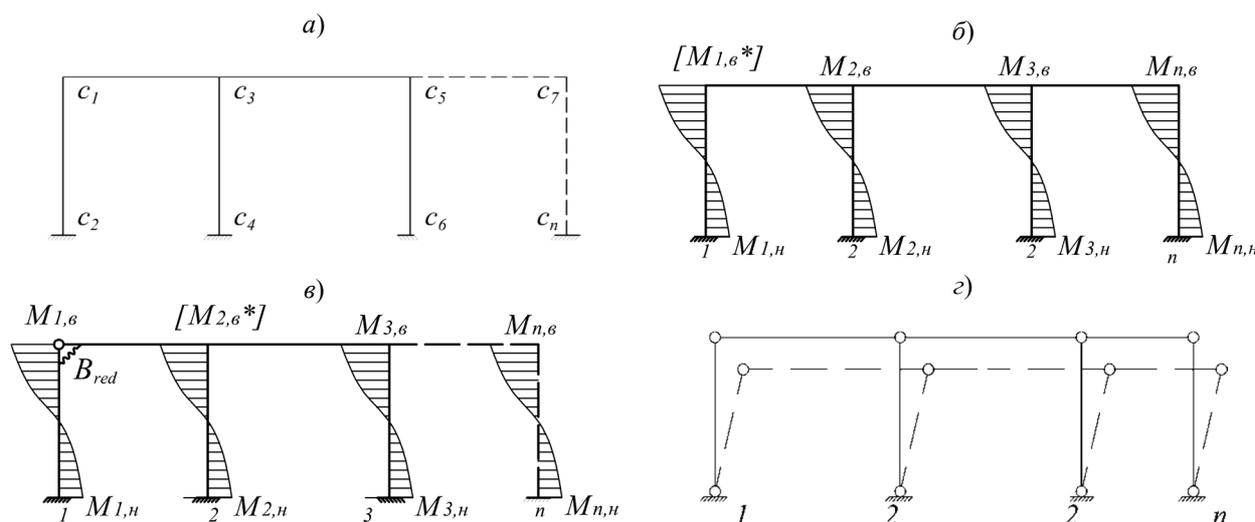
При разработке алгоритма приняты следующие основные гипотезы:

- под термином «живучесть» [5] будем понимать свойство конструктивной системы кратковременно выполнять заданные функции в полном или ограниченном объеме при отказе одного или нескольких элементов подсистемы или системы в целом;
- действующая на раму нагрузка изменяется параметрически, т.е. пропорционально одному параметру;
- прогрессирующее разрушение конструктивной системы будем определять таким набором сечений с пластическими шарнирами, которые превращают конструкцию в целом в кинематически изменяемую систему; локальное разрушение конструктивной системы будем определять набором сечений с пластическими шарнирами, охватывающими ограниченную часть элементов системы и не превращающими ее в кинематически изменяемую;
- физическая модель силового сопротивления и коррозионных повреждений железобетонных элементов рамно-стержневой конструктивной системы принята в соответствии с работой [6].

Действующую на рамно-стержневую систему эксплуатационную нагрузку выражаем через единый параметр  $P_{эсп}$ , определенный из расчета схемы второго уровня. Полагаем, что при действии этой нагрузки происходит внезапное выключение из работы элемента РЭ-1, раскрепляющего крайнюю стойку (см. рис. 2, б). Вызванное таким запроектным воздействием перераспределение усилий между элементами и узлами конструктивной системы может привести к по-

тере общей устойчивости и к образованию пластических шарниров в наиболее нагруженных опасных сечениях элементов системы вследствие истощения их силового сопротивления.

Сечения, где возможно образование пластических шарниров в конструктивной системе после запроектного воздействия, известны. Для рассматриваемой рамы на рисунке 3, а они обозначены  $c_1, c_2 \dots c_n$ . В практике проектирования конструктивно нелинейных рамно-стержневых систем определение сечений, где возможно выключение связей, для каждой конкретной конструкции при изменении степени статической неопределенности и соответственно перераспределение силовых потоков не представляет больших сложностей, используя для их проектного и запроектного расчета, например, вариант неординарного смешанного метода или метода перемещений [7].



**Рисунок 3 – Схема опасных сечений в элементах конструктивной системы (а); эпюры изгибающих моментов на относительных перемещениях до (б) и после (в) выключения связи; схемы прогрессирующего разрушения в предельном состоянии (г)**

Для формализации и последующей автоматизации расчета физически и конструктивно нелинейных систем применен метод перемещений. Определение последовательности образования пластических шарниров в конструктивной системе проводится методом кинематического анализа. Для деформированного состояния, соответствующего определенному значению критической силы, находится элемент с максимальным значением активной работы внутренних сил. В таком элементе максимальное значение относительного изгибающего момента возникнет, как правило, в узлах крепления стоек к ригелю ( $M_{n,\epsilon}$ ) и в опорных сечениях ( $M_{n,n}$ ) (рис. 3 б, в). Эти моменты определяются из следующих зависимостей:

$$M_{n,\epsilon} = 4 \cdot i_n \cdot \varphi_2(v_n) - \frac{6 \cdot i_n \cdot \varphi_4(v_n)}{l_n}; \tag{1}$$

$$M_{n,n} = 2 \cdot i_n \cdot \varphi_2(v_n) - \frac{6 \cdot i_n \cdot \varphi_4(v_n)}{l_n}. \tag{2}$$

В качестве предельного состояния на первом этапе расчета считается максимальное значение относительного изгибающего момента  $[M_{i,max}^*]$ , при котором в рассматриваемом узле рамно-стержневой системы образуется пластический шарнир (происходит первое локальное разрушение). Значение приведенной жесткости сечения железобетонного элемента с трещинами  $B_{red,i}$ , соответствующей состоянию пластического шарнира, вычислено с использованием шагово-итерационной процедуры в соответствии с методикой [3].

На следующем этапе расчета для изменившейся исходной расчетной схемы (рис. 3, в) выполняется расчет конструктивной системы с учетом значения приведенной жесткости сечения  $B_{red,i}$ , в результате которого определяется следующий элемент с наибольшей работой

внутренних сил, а так же вычисляются относительные изгибающие моменты, возникающие в узлах конструктивной системы при новом деформированном состоянии.

Увеличение нагрузки, при достижении которой происходит образование пластического шарнира на каждом последующем  $i$ -ом этапе расчета, определяем с помощью параметра  $\lambda$ :

$$P_{\lambda}^i = P_{\lambda}^{(i-1)} / \lambda, \quad (3)$$

где  $P_{\lambda}^{(i-1)}$  – нагрузка, действующая на систему на  $i-1$  этапе расчета.

На первом этапе расчета значение этой нагрузки составит  $P_{\lambda}^1 = P_{кр}^{(n-1)}$ , где  $P_{кр}^{(n-1)}$  – критическая сила для системы после приложения запроектного воздействия в виде внезапного выключения из работы элемента, раскрепляющего крайнюю стойку.

Параметр  $\lambda$  представляет собой отношение предельного значения относительного изгибающего момента в наиболее нагруженном сечении на  $i$ -ом этапе  $[M_{i,max}^*]$  к предельному значению относительного момента на  $(i-1)$  этапе расчета системы  $[M_{i-1,max}^*]$ :

$$\lambda = \frac{[M_{i,max}^*]}{[M_{i-1,max}^*]}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4) на первом этапе расчета параметр  $\lambda = 1$ .

Теоретически, признаком прогрессирующего разрушения конструкции рамы может считаться образование кинематически изменяемой системы (см. рис. 3,  $z$ ). Если же в процессе расчета на  $i$ -ом этапе выполняется условие  $P_{\lambda}^i \geq P_{эксн}$  ( $P_{эксн}$  – эксплуатационная нагрузка, действующая на исходную  $n$ -систему), то происходит стабилизация силового потока в конструктивной системе до превращения ее в кинематически изменяемую и, следовательно, имеет место локальное разрушение конструкции рамы.

Предложенная методика и алгоритм расчета живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при запроектных воздействиях применены Орловским академцентром при проектировании каркаса реконструируемого здания Белгородской государственной филармонии.

Проектный статический расчет каркаса, конечно-элементная модель, которого приведена на рисунке 4,  $a$ , выполнялся в программном комплексе SCAD v. 11.1. Для наиболее нагруженного фрагмента каркаса (рис. 4,  $b$ ) определялись критические параметры, характеризующие процесс потери устойчивости системы, и изгибающие моменты с учетом последовательного появления пластических шарниров в узлах сопряжения элементов рамы. Рассматриваемая стержневая система загружена внешней узловой нагрузкой, выраженной через единый параметр  $P_{эксн} = 79160$  кН, определенный в ходе расчета в ПК SCAD.

Переход ( $n$ ) системы (рис. 4,  $b$ ) из проектного в запроектное ( $n-1$ ) состояние (рис. 4,  $z$ ) характеризуется внезапным выключением из работы элементов, раскрепляющих третью стойку рамы. Значение критической силы для ( $n-1$ ) системы, изображенной на рисунке 4,  $z$ , составляет  $P_{кр}^{n-1} = 31528$  кН (табл. 1).

На первом этапе расчета, используя зависимости (1) и (2), определены значения относительных изгибающих моментов в стойках рассматриваемой конструктивной системы. Максимальное значение изгибающего момента зафиксировано в верхнем правом узле  $[M_{1,max}^*] = M_{1,\delta} = -24262$  кН·м, следовательно, в этом узле происходит образование первого пластического шарнира.

Для определения значения нагрузки  $P_{\lambda}^2$ , при достижении которой происходит образование следующего пластического шарнира (второй этап расчета,  $i=2$ ), выполняем расчет системы с учетом изменившейся приведенной жесткости верхнего узла первой стойки  $B_{red,1\delta}$ . Максимальное значение изгибающего момента при новом деформированном состоянии зафиксировано в верхнем узле второй стойки  $[M_{2,max}^*] = M_{2,\delta} = -20566$  кН·м. Используя зависимость (4), определяем обобщенный параметр  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{[M_{2,max}^*]}{[M_{1,max}^*]} = \frac{-20566}{-24262} = 0,85,$$

тогда нагрузка  $P_\lambda^2$  определяется в соответствии с (3):

$$P_\lambda^2 = P_\lambda^1 / \lambda = 31528 / 0,85 = 37194 \text{ кН}.$$

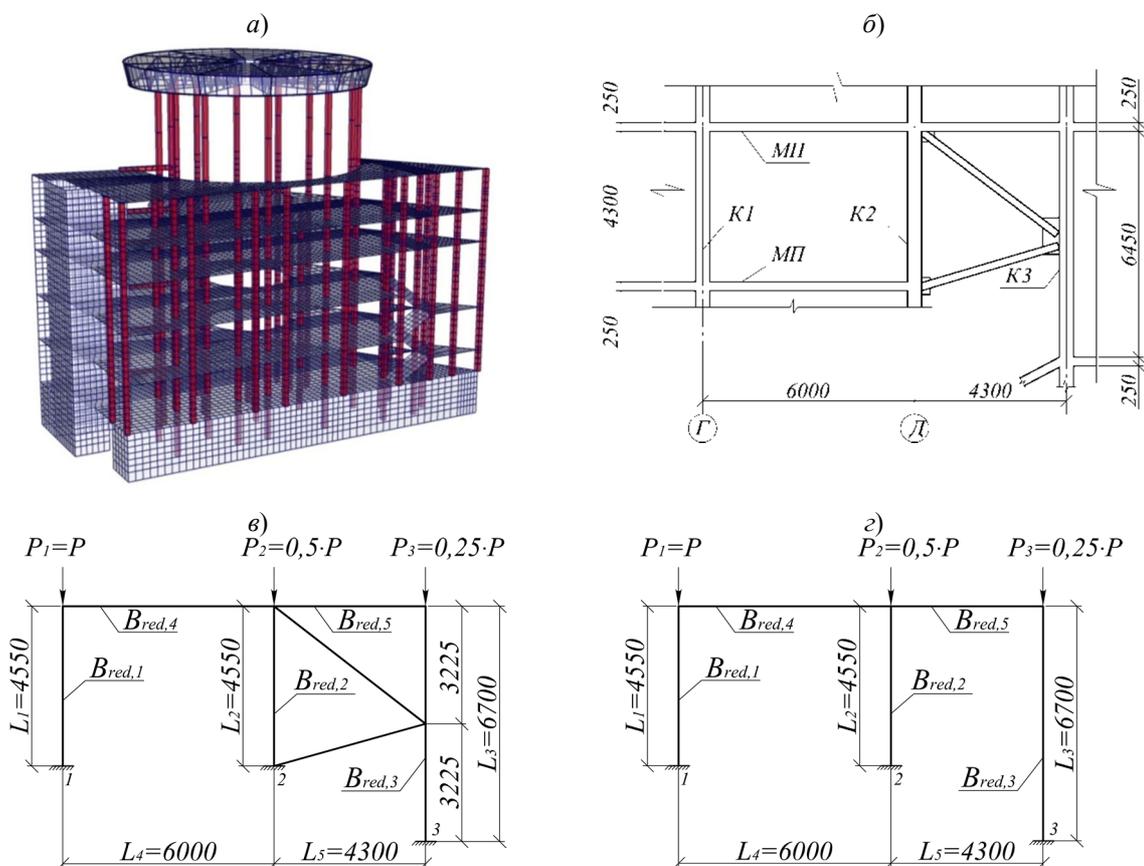


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель каркаса здания (а); конструктивная схема фрагмента каркаса здания (б); МП – монолитные плиты, К1...К3 – монолитные колонны; расчетная схема рассматриваемого фрагмента каркаса здания (в); расчетная схема рассматриваемого фрагмента каркаса здания после запроектного воздействия (г)

Аналогичным образом проведены все последующие этапы расчета по определению значений нагрузки  $P_\lambda^i$  и параметра  $\lambda$  результаты, которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета живучести конструктивной системы

Этап расчета	Расчетная схема рамы	Параметры живучести	
i=1		$\lambda = \frac{-24262}{-24262} = 1$	$P_\lambda^1 = P_{кр}^{n-1} = 31528 \text{ кН}$
		$M_{1,н} = 21863 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$[M_{1,max}^*] = M_{1,6} = -24262 \text{ кН}\cdot\text{м}$
		$M_{2,н} = 17396 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$M_{2,6} = -17582 \text{ кН}\cdot\text{м}$
		$M_{3,н} = 8677 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$M_{3,6} = -9083 \text{ кН}\cdot\text{м}$
i=2		$\lambda = \frac{-20566}{-24262} = 0,85$	$P_\lambda^2 = \frac{31528}{0,85} = 37194 \text{ кН}$
		$M_{1,н} = 6664 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$[M_{2,max}^*] = M_{2,6} = -20566 \text{ кН}\cdot\text{м}$
		$M_{2,н} = 19694 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$M_{3,6} = -8902 \text{ кН}\cdot\text{м}$
		$M_{3,н} = 8488 \text{ кН}\cdot\text{м}$	

Окончание табл. 1

i=3		$\lambda = \frac{-10891}{-20566} = 0,53$	$P_{\lambda}^3 = \frac{37194}{0,53} = 70177 \text{ кН}$
		$M_{1,н} = 7904 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$M_{2,н} = 6327 \text{ кН}\cdot\text{м}$
		$M_{3,н} = 9672 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$[M_{3,max}^*] = M_{3,6} = -10891 \text{ кН}\cdot\text{м}$
i=4		$\lambda = \frac{-5190}{-10891} = 0,47$	$P_{\lambda}^4 = \frac{70177}{0,47} = 149313 \text{ кН}$
		$[M_{4,max}^*] = M_{1,н} = 5190 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$M_{2,н} = 3981 \text{ кН}\cdot\text{м}$
		$M_{3,н} = 3527 \text{ кН}\cdot\text{м}$	

В результате оказалось, что на четвертом этапе расчета нагрузка  $P_{\lambda}^4 = 149313 \text{ кН}$  превышает эксплуатационное значение  $P_{эксн} = 79160 \text{ кН}$ , что свидетельствует о стабилизации силового потока, т.е. в конструкции рамы произошло бы локальное, а не прогрессирующее разрушение.

Анализ полученных результатов расчета рассматриваемой конструктивной системы показал, что внезапное выключение из работы раскрепляющих элементов с последующей потерей общей устойчивости системы приведет к образованию двух пластических шарниров и последующей локализации процесса разрушения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов, В.И. Экспериментально-теоретические исследования живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельного элемента [Текст] / В.И. Колчунов, Л.В. Кожаринова, Н.О. Прасолов // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ. – 2011. – Т. 2, 3. – С. 109-115.
2. Перельмутер, А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Киев: Сталь, 2002. – 600 с.
3. Колчунов, В.И. Влияние коррозионных повреждений отдельных элементов на устойчивость железобетонных рамно-стержневых систем. [Текст] / В.И. Колчунов, Л.В. Кожаринова, Н.О. Прасолов, Г.А. Добриков // Вестник отделения строительных наук. – М.: РААСН. – 2010. – С. 107-112.
4. Колчунов, В.И. К оценке живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельных элементов / В.И. Колчунов, Н.О. Прасолов, М.В. Моргунов // Строительная механика инженерных конструкций, 2007. – №4. – С. 40-44.
5. Бондаренко, В.М. Некоторые предложения к развитию теории конструктивной безопасности и живучести статически неопределимых конструктивных систем [Текст] / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2012. – №6. – С. 7-12.
6. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст]: монография / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
7. Милейковкий, И.Е. Неординарный смешанный метод расчета рамных систем с элементами сплошного и составного сечений [Текст] / И.Е. Милейковкий, В.И. Колчунов // Известия ВУЗов. Строительство. – 1995. – №7-8. – С. 32-37.

#### Колчунов Виталий Иванович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и материалы»  
 E-mail: skimkafedra@yandex.ru  
 Тел.: +7 (4862) 73-43-49

#### Прасолов Николай Олегович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
 Ассистент кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
 E-mail: oantc@mail.ru

#### Кожаринова Лилия Владимировна

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и материалы»

**Ветрова Ольга Анатольевна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и материалы»

V.I. KOLCHUNOV, N.O. PRASOLOV, L.V. KOZHARINOVA, O.A. VETROVA

**SOME CONSIDERATIONS TO THE ALGORITHM  
FOR SURVIVABILITY CALCULATION OF REINFORCED  
CONCRETE FRAME STRUCTURES AT THE MOMENT  
OF BUCKLING**

*The article considers the algorithmization problem for survivability parameters calculation of reinforced concrete structural systems with buckling of single elements. The basis of the algorithm is half-analytical slope deflection method with gradual iteration for disclosure of the physical nonlinearity. Authors present the survivability calculation results for a structural system of a frame building which is under reconstruction.*

**Keywords:** calculation algorithm, structural survivability, structural system, the actions beyond design basis, buckling.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kolchunov, V.I. Jeksperimental'no-teoreticheskie issledovanija zhivuchesti zhelezobetonnyh ram pri potere ustojchivosti otdel'nogo jelementa [Tekst] / V.I. Kolchunov, L.V. Kozharinova, N.O. Prasolov // Vestnik MGSU. – M.: MGSU. – 2011. – T. 2, 3. – S. 109-115.
2. Perel'muter, A.V. Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ih analiza [Tekst] / A.V. Perel'muter, V.I. Slivker. – Kiev: Stal', 2002. – 600 s.
3. Kolchunov, V.I. Vlijanie korrozionnyh povrezhdenij otdel'nyh jelementov na ustojchivost' zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevnyh sistem. [Tekst] / V.I. Kolchunov, L.V. Kozharinova, N.O. Prasolov, G.A. Dobrikov // Vestnik otdele-nija stroitel'nyh nauk. – M.: RAASN. – 2010. – S. 107-112.
4. Kolchunov, V.I. K ocenke zhivuchesti zhelezobetonnyh ram pri potere ustojchivosti otdel'nyh jelementov / V.I. Kolchunov, N.O. Prasolov, M.V. Morgunov // Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij, 2007. – №4. – S. 40-44.
5. Bondarenko, V.M. Nekotorye predlozhenija k razvitiyu teorii konstruktivnoj bezopasnosti i zhivuchesti staticheski neopredelimyh konstruktivnyh sistem [Tekst] / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov, N.V. Kljueva // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2012. – №6. – S. 7-12.
6. Bondarenko, V.M. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona [Tekst]: monografija / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – M.: ASV, 2004. – 472 c.
7. Milejkovkij, I.E. Neordinarnyj smeshannyj metod rascheta ramnyh sistem s jelementami sploshnogo i sostavnygo sechenij [Tekst] / I.E. Milejkovkij, V.I. Kolchunov // Izvestija VUZov. Stroitel'stvo. – 1995. – №7-8. – S. 32-37.

**Kolchunov Vitalij Ivanovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical sciences, professor, head of department «Construction structures and materials»  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru  
Ph.: +7 (4862) 73-43-49

**Prasolov Nikolay Olegovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Assistant of department «Construction structures and materials»  
E-mail: oantc@mail.ru

**Kozharinova Lilia Vladimirovna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor at department «Construction structures and materials»

**Vetrova Olga Anatolyevna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor at department «Construction structures and materials»

КОРОБКО А.В., ПРОКУРОВ М.Ю., САВИН С.Ю.

## ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА УПРУГИХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИНОК НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ФОРМЫ

*В статье представлена методика, общий алгоритм и пример работы программы определения максимального прогиба упругих ортотропных пластинок в виде произвольных треугольников, прямоугольников, ромбов, параллелограммов, равнобоких трапеций и правильных многоугольников с различными комбинациями граничных условий, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой. Решение задачи основывается на использовании метода интерполяции по коэффициенту формы.*

**Ключевые слова:** упругие ортотропные пластинки, равномерно распределенная нагрузка, максимальный прогиб, коэффициент формы, программа.

Пластинки различного очертания широко применяются в строительстве, авиа- и кораблестроении, являясь несущими и ограждающими конструкциями покрытий и перекрытий современных зданий и сооружений, элементами фюзеляжа и крыла самолета, обшивки корабля. При использовании анизотропных материалов или наличии характерных конструктивных особенностей (постановка ребер жесткости, армирование, гофрирование) упругие свойства пластинок различаются вдоль некоторых, чаще, взаимно перпендикулярных направлений, что повышает сложность расчетно-проектировочной задачи.

Расчет ортотропных пластинок предполагает, в основном, использование численных методов (МКЭ, МГЭ), реализованных в универсальных программных комплексах: SCAD, Stark ES, ANSYS и др. Однако такой подход к решению задачи зачастую ведет к потере ее физической сущности и возможности правильной интерпретации полученных результатов. Этим недостатком лишен эффективный инженерный метод расчета пластинок – метод интерполяции по коэффициенту формы\* (МИКФ), разработанный А.В. Коробко [1].

Сущность МИКФ заключается в следующем:

*Пусть для пластинки заданной формы  $X$  необходимо найти значение некоторой интегральной физической характеристики (максимальный прогиб, частота собственных колебаний, критическая сила). При этом существуют две различные по форме пластинки  $A$  и  $B$ , для которых искомые интегральные характеристики известны (опорные решения). Если форму рассматриваемой пластинки  $X$  можно получить в результате какого-либо непрерывного геометрического преобразования пластинок от  $A$  к  $B$ , то искомая величина для  $X$  может быть найдена интерполяцией опорных решений по коэффициенту формы, значения которого определяются геометрическими параметрами  $A$ ,  $B$  и  $X$ .*

В настоящей статье представлена компьютерная программа *OrthPlate*, реализующая МИКФ для деформационного расчета упругих ортотропных пластинок в виде треугольников, прямоугольников, ромбов, параллелограммов, равнобоких трапеций и правильных многоугольников при однородных и комбинированных условиях контурного опирания.

В качестве исходных данных к расчету принимаются следующие физико-механические характеристики:  $E_x$ ,  $E_y$  – модули упругости материала вдоль двух взаимно перпендикулярных осей  $x$ ,  $y$ ;  $G_{xy}$  – модуль сдвига, характеризующий изменение в результате деформации угла

---

\* Безразмерная геометрическая характеристика формы области, в общем виде представляющая собой интеграл:  $K_f = \oint_L \frac{ds}{h}$ , где  $ds$  – линейный элемент контура области;  $h$  – перпендикуляр, опущенный на него из некоторого полюса внутри этой области.

между осями  $x, y$ ;  $\nu_x$  – коэффициент Пуассона, характеризующий расширение (сужение) волокон вдоль оси  $y$ , при деформации растяжения (сжатия) вдоль оси  $x$ ;  $q$  – значение нагрузки, равномерно распределенной по всей поверхности пластинки.

Общим геометрическим параметром для пластинок всех типов очертания является значение их толщины  $h = const$ . В программе рассматриваются пластинки средней толщины, для которых удовлетворяется неравенство:

$$D_{\min}/100 < h < D_{\min}/10,$$

где  $D_{\min}$  – минимальный габаритный размер пластинки в плане.

Другие исходные геометрические данные зависят от формы рассматриваемых пластинок:

- *треугольники*:  $\alpha, \beta$  – углы треугольника;  $a$  – длина стороны, заключенной между ними;
- *ромбы*:  $\alpha$  – острый угол;  $a$  – длина стороны;
- *прямоугольники*:  $a, b$  – длины сторон;
- *параллелограммы*:  $\alpha$  – острый угол;  $a, b$  – длины сторон;
- *равнобокие трапеции*:  $\alpha$  – острый угол;  $a, b$  – длины оснований;
- *правильные многоугольники*:  $n$  – число сторон;  $a$  – длина стороны.

Угловые меры фигур задаются в градусах, линейные размеры – в метрах.

В качестве граничных условий рассматривается жесткое защемление или шарнирное опирание по всему контуру пластинки, а также все возможные комбинации их сочетаний по отдельным ее сторонам. Возможные комбинации граничных условий для характерных очертаний контура пластинок в рассматриваемой односвязной задаче представлены в виде исчерпывающего набора схем:

- *треугольники* – 6 схем;
- *прямоугольники* – 9 схем;
- *ромбы* – 7 схем;
- *параллелограммы* – 10 схем;
- *равнобокие трапеции* – 12 схем (рис. 1);
- *правильные многоугольники* (с учетом направления осей ортотропии вдоль сторон или через вершины фигуры) – 2 схемы.

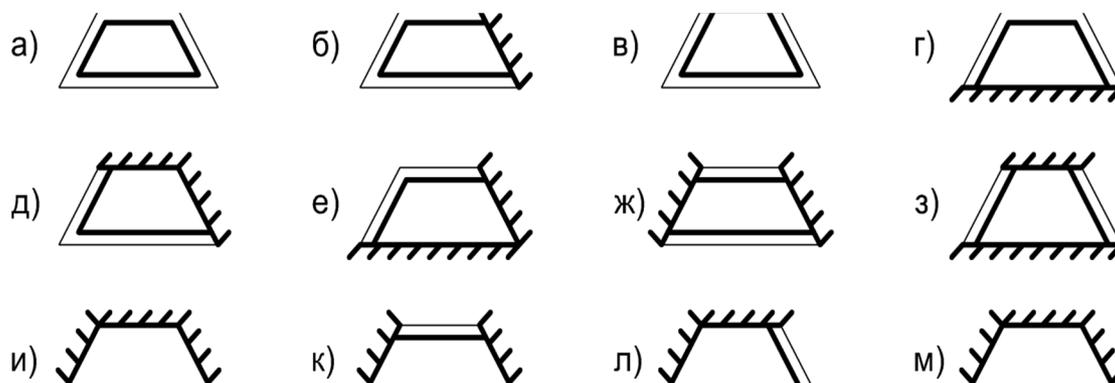


Рисунок 1 – Комбинации граничных условий для пластинок в виде равнобоких трапеций

Для правильных многоугольников рассматриваются только однородные условия опирания ввиду начальной неопределенности числа их сторон.

Опорные решения задаются в виде функций, определяющихся изопериметрическим выражением максимального прогиба упругой ортотропной пластики [2]:

$$w = f(K_f; D_x/H; D_y/H) \frac{qA^2}{H}, \quad (1)$$

где  $H = D_1 + 2D_{xy}$ ;  $D_1 = D_x \nu_y = D_y \nu_x$ ;  $D_x, D_y, D_{xy}$  – цилиндрические жесткости;  $f(K_f; D_x/H; D_y/H)$  – некоторая функция, соответствующая пластинкам определенного класса формы, зависящая от геометрических параметров очертания и соотношения цилиндрических жесткостей.

Значения максимальных прогибов для пластинок в виде равнобедренных и прямоугольных треугольников, прямоугольников, ромбов и правильных многоугольников определяются непосредственно по аппроксимирующим функциям (1), полученным ранее в работах [2...5].

Некоторые из этих зависимостей используются для нахождения опорных решений при проведении интерполяции по коэффициенту формы, применяемой в задачах, связанных с рассмотрением пластинок в виде равнобоких трапеций, параллелограммов и произвольных треугольников. В подобных случаях получение результата также связано с построением аппроксимаций, задающихся выражением следующего вида:

$$w_0 = C \cdot \frac{A^2}{B \cdot K_f + K_f^2}. \quad (2)$$

Принятый вид аппроксимирующих функций (2) является естественным, т.к. аналогичен выражению (1). При этом реализуется обратно пропорциональная связь между прогибами пластинки и значениями коэффициента формы в ее соответствующих точках, обозначенная в работе [1]. Коэффициенты  $C$  и  $B$  выражения (2) определяются решением системы уравнений:

$$\begin{cases} w_{01} = C \cdot \frac{A_1^2}{B \cdot K_{f1} + K_{f1}^2}, \\ w_{02} = C \cdot \frac{A_2^2}{B \cdot K_{f2} + K_{f2}^2}; \end{cases} \quad (3)$$

где  $w_{01}$ ,  $w_{02}$  – значения максимальных прогибов для пластинок, являющихся граничными по отношению к заданной (опорные решения);  $K_{f1}$ ,  $K_{f2}$  – соответствующие значение коэффициентов формы;  $A_1$ ,  $A_2$  – их площади.

Решение системы (3) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} B = \frac{(w_{02} \cdot K_{f2}^2 - w_{01} \cdot K_{f1}^2)}{(w_{02} \cdot K_{f2} - w_{01} \cdot K_{f1})}, \\ C = w_{01} \cdot (B \cdot K_{f1} + K_{f1}^2). \end{cases}$$

В зависимости от особенностей очертания контура пластинки используются различные геометрические преобразования, позволяющие получить ее из опорных фигур. Геометрические преобразования, используемые для расчета трапециевидальных пластинок, описаны ниже.

Если для трапеции значение минимального коэффициента формы  $K_f < 10,393$ , то форма области может быть получена путем растяжения (сжатия) треугольника (прямоугольника) вдоль прямых  $oc$  и  $od$  (рис. 2, а).

При значениях  $K_f \in [10,393; 19,5]$  трапеция получается в результате поворота сторон прямоугольника (треугольника) относительно точек  $c$  и  $d$ , сопровождающегося сжатием или растяжением (рис. 2, б).

В двух указанных случаях для коэффициентов формы фигур должно выполняться неравенство:

$$K_{f2} < K_f < K_{f1}, \quad (4)$$

где  $K_{f1}$ ,  $K_{f2}$  – коэффициенты формы треугольника и прямоугольника соответственно.

Если для трапеции при  $K_f \in [10,393; 19,5]$  неравенство (4) не выполняется, применяется следующее геометрическое преобразование: сжатие (растяжения) прямоугольника (треугольника) вдоль прямых  $oc$ ,  $od$ ,  $oe$ ,  $of$  (рис. 2, в).

Если значение коэффициента формы трапеции  $K_f > 19,5$ , выполняется преобразование, при котором трапеция образуется в результате поворота сторон треугольника (прямоугольника) относительно точек  $c$  и  $d$  (рис. 2, г).

Последним случаям соответствует неравенство  $K_{f1} < K_f < K_{f2}$ .

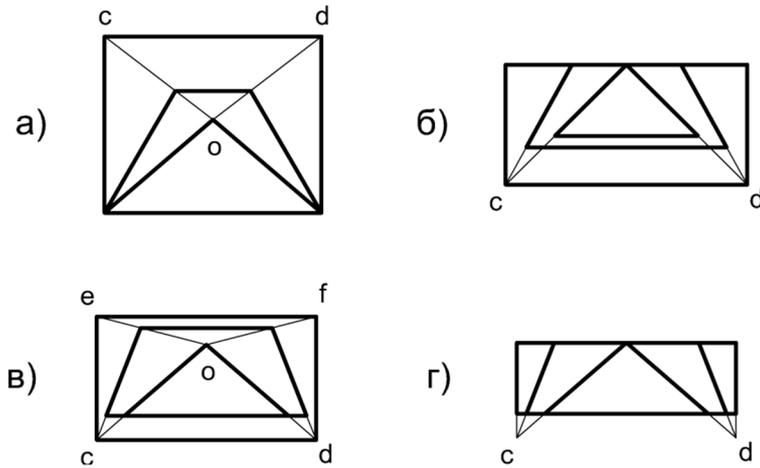


Рисунок 2 – Геометрические преобразования трапеций к треугольнику и прямоугольнику

Общий алгоритм программы *OrthPlate*, реализующей описанную методику расчета упругих ортотропных пластинок, приведен на рисунке 3.

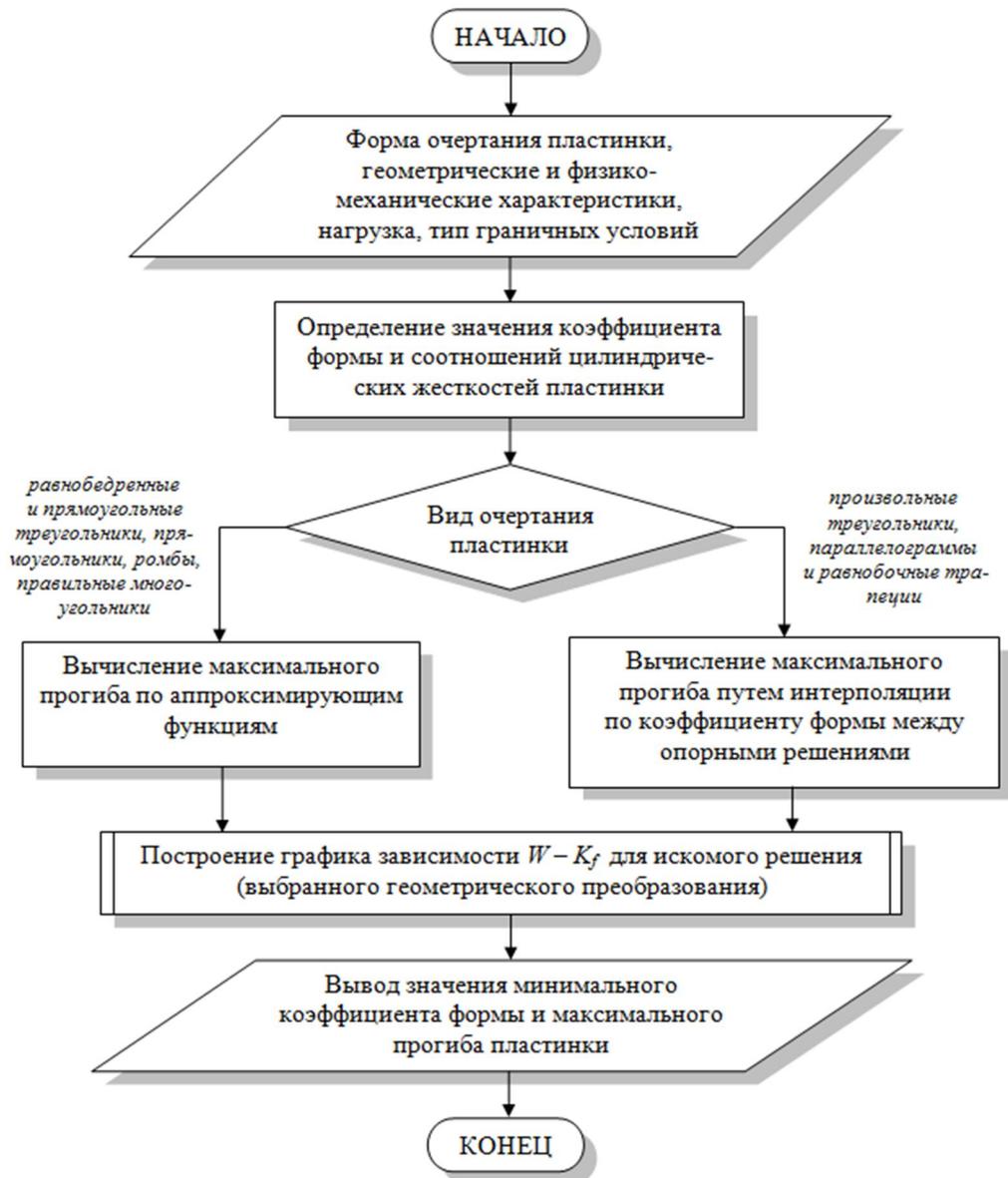


Рисунок 3 – Общий алгоритм программы *OrthPlate*

Рассмотрим пример расчета ортотропной пластики в виде равнобокой трапеции.

В качестве исходных данных примера приняты следующие значения геометрических и физико-механических параметров:  $a = 2$  м;  $b = 1,6$  м;  $h = 0,02$  м;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $E_x = 9000$  МПа;  $E_y = 6000$  МПа;  $G_{xy} = 750$  МПа;  $\nu_x = 0,085$ ;  $q = 1000$  Н/м при шарнирном опирании пластинки по всему контуру (рис. 4).

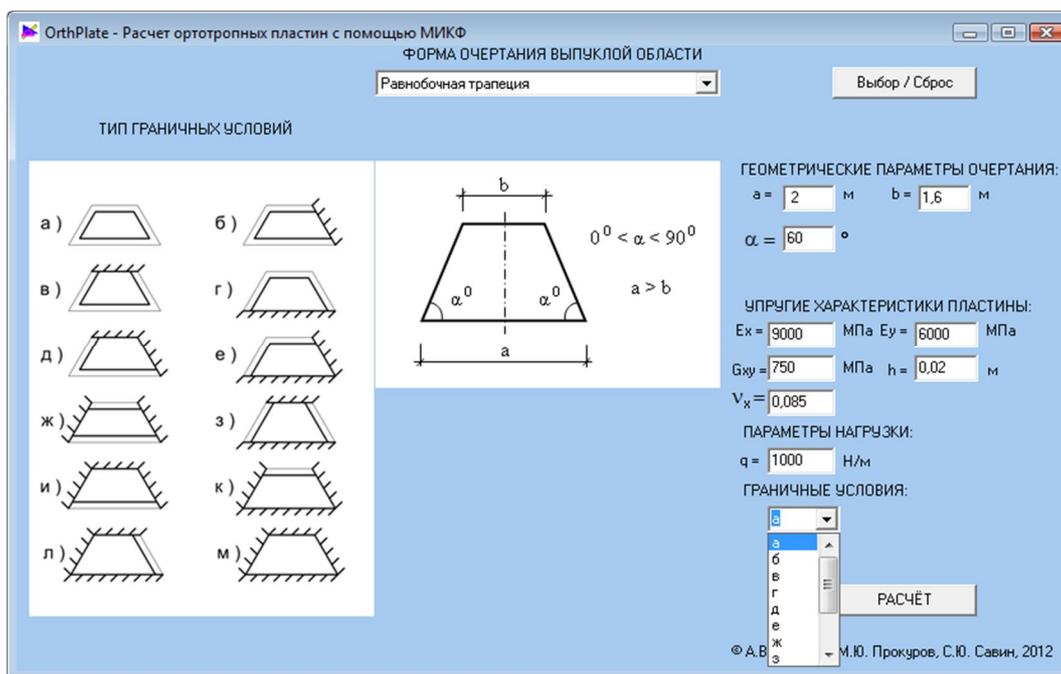


Рисунок 4 – Ввод исходных данных в рабочем окне программы OrthPlate

После ввода исходных данных и нажатия кнопки «РАСЧЕТ» в рабочем окне программы выводится значение минимального коэффициента формы, соответствующего заданной форме пластинки, и величина максимального прогиба в метрах, а также масштабная схема пластинки и графическая иллюстрация используемого геометрического преобразование фигур (рис. 5). В отдельном окне программы автоматически отображается графическая интерпретация применения МИКФ к расчету рассматриваемой пластинки (рис. 6).

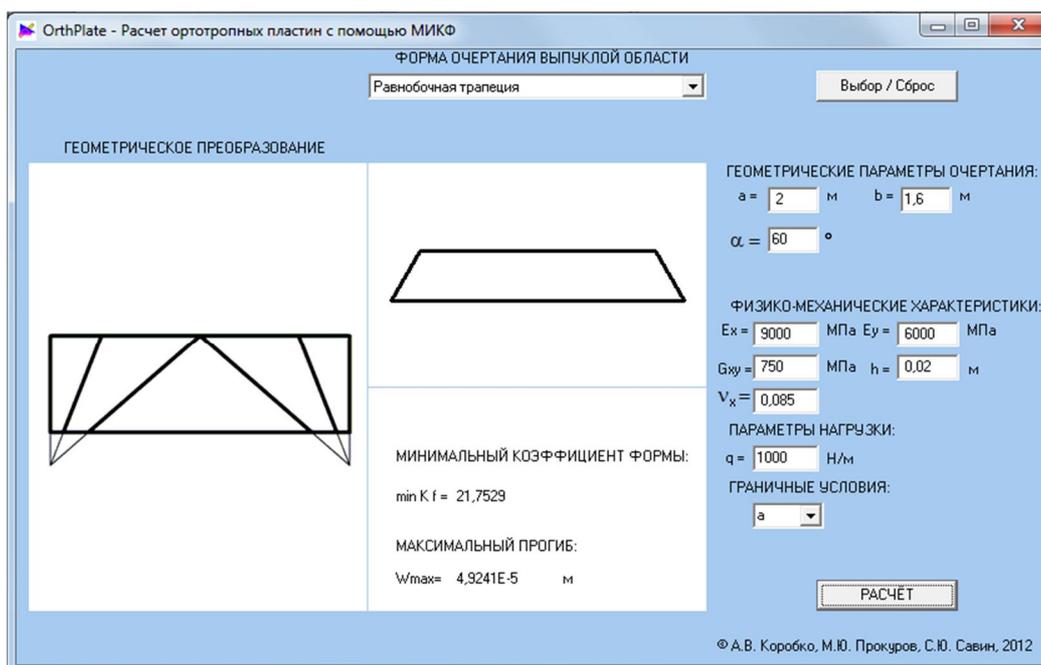


Рисунок 5 – Результаты расчета трапецевидной пластинки

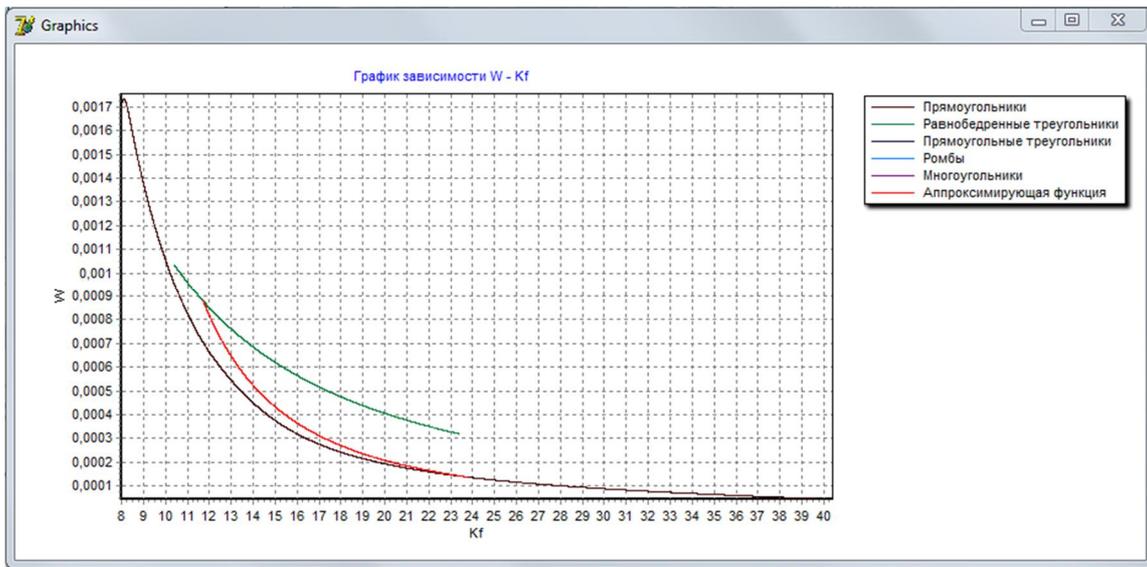


Рисунок 6 – Окно графической интерполяции решения по зависимостям  $W-K_f$

### Выводы

1. Разработана методика расчета максимальных значений прогибов упругих ортотропных пластинок в виде прямоугольников, треугольников, параллелограммов, равнобоких трапеций и правильных многоугольников с комбинированными граничными условиями контурного опирания, воспринимающих действие нагрузки, равномерно распределенной по всей их площади.
2. Разработано специализированное программное обеспечение для проведения деформационных расчетов пластинок указанного вида при решении расчетно-проектировочных задач строительства и машиностроения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.
2. Коробко, В.И. Изгиб прямоугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2011. – №5 (37). – С. 33-39.
3. Коробко, В.И. Изгиб треугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин, С.В. Бояркина // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – №1 (39). – С. 7-14.
4. Коробко, В.И. Изгиб ортотропных пластинок в виде параллелограмма с однородными и комбинированными граничными условиями [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2012. – №2. – С. 18-23.
5. Коробко, В.И. Изгиб ортотропных пластинок в виде ромбов с комбинированными граничными условиями [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2012. – №3 (41). – С. 25-30.

#### Коробко Андрей Викторович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
 Тел.: +7 (4862) 76-03-72

#### Прокуров Максим Юрьевич

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции»  
 Тел.: +7 (4832) 64-59-15  
 E-mail: m.prokuroff@mail.ru

**Савин Сергей Юрьевич**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 76-03-72  
E-mail: oantc@ostu.ru

---

A.V. KOROBKO, M.Yu. PROKUROV, S.Yu. SAVIN

**PROGRAM OF DEFINITION MAXIMUM DEFLECTION  
OF BENT ELASTIC ORTHOTROPIC PLATES WITH USING  
THE INTERPOLATION TECHNIQUE BY SHAPE FACTOR**

*In the article a technique, general algorithm and example of the program of definition maximum deflection of elastic orthotropic plates in the form of arbitrary triangles, rectangles, rhombs, parallelograms, isosceles trapezoids and polygons with various combinations of the boundary conditions and loaded with evenly distributed loading are shown. Solving of this problem is based on using the interpolation technique by shape factor.*

**Keywords:** *elastic orthotropic plates, evenly distributed loading, maximum deflection, shape factor, program.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: ASV, 1999. – 320 s.
2. Korobko, V.I. Izgib prjamoougol'nyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi i kombinirovannymi granichnymi uslovijami [Tekst] / V.I. Korobko, C.Ju. Savin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №5 (37). – S. 33-39.
3. Korobko, V.I. Izgib treugol'nyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi i kombinirovannymi granichnymi uslovijami [Tekst] / V.I. Korobko, C.Ju. Savin, S.V. Bojarkina // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №1 (39). – S. 7-14.
4. Korobko, V.I. Izgib ortotropnyh plastinok v vide parallelogramma s odnorodnymi i kombinirovannymi granichnymi uslovijami [Tekst] / V.I. Korobko, S.Ju. Savin // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2012. – №2. – S. 18-23.
5. Korobko, V.I. Izgib ortotropnyh plastinok v vide rombov s kombinirovannymi granichnymi uslovijami [Tekst] / V.I. Korobko, S.Ju. Savin // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2012. – №3 (41). – S. 25-30.

**Korobko Andrew Viktorovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical science, professor of department «Theoretical and applied mechanics»  
Ph.: +7 (4862) 76-03-72

**Prokurov Maxim Yuryevich**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Candidate of technical sciences, associate professor of department «Building designs»  
Ph.: +7 (4832) 64-59-15  
E-mail: m.prokuroff@mail.ru

**Savin Sergey Yuryevich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Post-graduate student of department «Building designs and materials»  
Ph.: +7 (4862) 76-03-72  
E-mail: oantc@ostu.ru

МЕРКУЛОВ С.И.

## К ВОПРОСУ О РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕНОВАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ

*В работе сформулированы общие положения реконструкции и реновации строительных конструкций и конструктивных систем, предложена основная терминология, определены основные требования к реконструкции эксплуатируемых объектов.*

**Ключевые слова:** конструктивные системы, реконструируемый железобетон, восстановление, реконструкция, реновация.

Конструктивные системы зданий и сооружений отличаются значительными сроками эксплуатации. Современные тенденции в инвестиционной политике, направленные на техническое перевооружение и переориентацию действующих производств, обусловили значительный рост объемов реконструкции объектов промышленности, жилищного и коммунального хозяйства, энергетики и других отраслей.

При реконструкции зданий и сооружений выделяют следующие уровни мероприятий [1]:

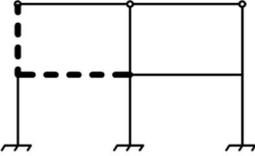
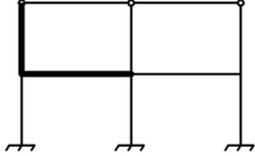
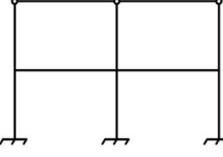
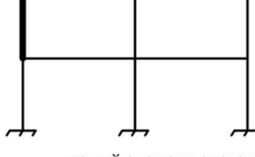
1. Восстановление – комплекс мероприятий, обеспечивающих восстановление эксплуатационных качеств конструкций до проектного уровня, утраченных в процессе эксплуатации.

2. Усиление – комплекс мероприятий, обеспечивающих повышение несущей способности и эксплуатационных свойств строительной конструкции по сравнению с фактическим состоянием или по сравнению с проектными показателями.

К настоящему времени сложился подход к разработке методов проектирования усиления конструкций как к решению прикладных задач. В нормативных документах [2, 3] приводятся лишь общие указания по расчету и конструированию усиления строительных конструкций. В научно-технической литературе термин «усиление конструкции» равнозначно применяется и при восстановлении и при усилении конструкции любым из методов.

Необходимо более широко рассматривать вопросы проектирования конструктивных систем при реконструкции зданий и сооружений, целесообразно перейти к следующему уровню мероприятий: восстановление, реконструкция, реновация (табл. 1).

Таблица 1 – Реконструкция и реновация конструктивных систем

Мероприятия	Первоначальное состояние конструктивной системы	Новое состояние системы
Восстановление	 - - - поврежденный элемент	 — восстановленный элемент
Реконструкция		 изменение расчетной схемы
Реновация	 - - - поврежденный элемент	 — новый элемент системы

Предлагается следующее определение этих терминов:

1. Восстановление – мероприятия, обеспечивающие восстановление несущей способности и эксплуатационных качеств строительной конструкции до проектного уровня, утраченных в процессе эксплуатации.

2. Реконструкция – мероприятия, повышающие несущую способность и эксплуатационные параметры строительной конструкции или конструктивной системы в целом до уровня, отвечающего изменившимся условиям эксплуатации.

3. Реновация – замещение элементов конструктивной системы, выбывающих из эксплуатации в результате физического износа.

Понятие «реновация» применительно к строительным объектам отсутствует в нормативных документах. В настоящее время реновация здания учитывается как отдельное направление развития строительного фонда. Например, в постановлении Правительства Москвы №28-ПП от 21.01.2003 г. «О программе капитального ремонта, модернизации, реконструкции и реновации зданий, сооружений и территорий сложившейся застройки...» дается определение реновации как замене не подлежащего сохранению жилищного фонда путем его сноса и жилищного строительства на высвобождаемой территории.

Для обеспечения конструктивной безопасности конструкций и конструктивных систем на протяжении жизненного цикла здания или сооружения выполняют восстановление или реконструкцию в зависимости от условий эксплуатации.

В результате усиления конструкций и конструктивных систем образуется самостоятельный класс строительных конструкций. Применительно к железобетону автором предложен термин «реконструируемый железобетон» [4], которому присущи следующие особенности: работа в составе конструкции бетонов с различными прочностными и деформативными свойствами, при наличии в одном из бетонов повреждений силового и не силового (температурного, влажностного, коррозионного) характера; наличие в усиливаемом элементе напряженно-деформируемого состояния, обусловленного историей эксплуатации; многообразие конструктивных решений усиления железобетонных конструкций; изменение граничных условий и трансформация внутренних и внешних связей до и после усиления; адаптация конструкций и конструктивных систем к внешним воздействиям; трансформация конструктивных систем зданий и сооружений в процессе эксплуатации и в результате усиления. Существующие методы проектирования усиления конструктивных систем не учитывают отмеченные особенности.

Реконструкция эксплуатируемых зданий и сооружений должна обеспечивать требования Федерального закона №ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», для чего принятие и выбор решения по возможным вариантам восстановления, реконструкции и реновации объекта должны базироваться на правильной оценке и учете фактического состояния конструкций. При реконструкции или реновации конструкций и конструктивных систем объекта необходимо обеспечить надежность и долговечность объекта после реализации проекта реконструкции и реновации; технологичность выбранного варианта с учетом трудоемкости, материалоемкости и сроков выполнения работ; безопасность объекта при проведении работ. Если при реконструкции действующего объекта возникает необходимость увеличения несущей способности и эксплуатационных параметров строительных конструкций, то следует принимать конструктивные решения, повышающие статическую неопределимость схемы здания.

Такой подход предполагает разработку теории реконструкции и реновации конструктивных систем, практических методов рационального проектирования реконструкции и восстановления строительных конструкций и конструктивных систем на основе экспериментально-теоретических исследований. Реализация этой цели обеспечивается проведением комплексных фундаментальных исследований, разработкой на их основе практических методов проектирования реконструкции и реновации конструктивных систем, формирования комплекса норм и правил. Основными задачами исследований является:

- разработка модели мониторинга технического состояния конструктивных систем, в том числе на основе ограниченного объема экспериментальных данных;

- разработка методов диагностики, оценки конструктивной безопасности и ресурса силового сопротивления эксплуатируемых конструктивных систем при силовых и средовых повреждениях;

- разработка эффективных методов проектирования реконструкции и реновации конструктивных систем;

- экспериментально-теоретическими исследованиями установить физические закономерности и параметры напряжено-деформированного состояния конструктивных систем при реконструкции и реновации.

Разрабатываемая теория реконструкции и реновации конструктивных систем позволит повысить безопасность эксплуатации объектов с учетом природно-климатических воздействий, износа и накопления повреждений строительных конструкций и конструктивных систем, внедрить инновационные подходы реконструкции зданий и сооружений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций [Текст]. – М.: Госстрой России, 2003. – 26 с.
2. СНиП II-23.81\* Стальные конструкции [Текст]. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 90 с.
3. СНиП 2.03.01-84\* Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
4. Бондаренко, В.М. Некоторые вопросы развития теории реконструированного железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, С.И. Меркулов // Бетон и железобетон. – М., 2005. – №1. – С. 25-26.

**Меркулов Сергей Иванович**

Курский государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»

E-mail: mersi.dom@yandex.ru

---

S.I. MERKULOV

### TO THE QUESTION OF RECONSTRUCTION AND RENOVATION OF CONSTRUCTIVE SYSTEMS

*In the work of the General provisions of the reconstruction and renovation of building structures and structural systems, offered basic terminology, defined the main requirements to the reconstruction of operating objects.*

**Keywords:** *structural systems, reconstructed reinforced concrete, restoration, reconstruction, renovation.*

### BIBLIOGRAPHY

1. SP 13-102-2003 Pravila obsledovaniya nesushhih stroitel'nyh konstrukcij [Tekst]. – M.: Gosstroj Rossii, 2003. – 26 s.
2. SNiP II-23.81\* Stal'nye konstrukcii [Tekst]. – M.: FGUP CPP, 2005. – 90 s.
3. SNiP 2.03.01-84\* Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii [Tekst]. – M.: CИTP Gosstroja SSSR, 1989. – 80 s.
4. Bondarenko, V.M. Nekotorye voprosy razvitija teorii rekonstruirovannogo zhelezobetona [Tekst] / V.M. Bondarenko, S.I. Merkulov // Beton i zhelezobeton. – M., 2005. – №1. – S. 25-26.

**Merkulov Sergey Ivanovich**

Kursk state university, Kursk

Doctor of technical science, professor, head of department «Industrial and civil engineering»

E-mail: mersi.dom@yandex.ru

ТРАВУШ В.И., АНТОШКИН В.Д., ЕРОФЕЕВ В.Т., ГУДОЖНИКОВ С.С.

## СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

*Рассмотрены вопросы конструктивно-технологического формообразования сферических оболочек на основе геодезической сети. Исследовано несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере, которые были названы «Транер». В каждой из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможность укрупнительной сборки и предварительного напряжения.*

**Ключевые слова:** сборная сферическая оболочка, конструктивно-технологическая форма, панель, правильный шестиугольник, разрезка, купол.

В отечественной практике при возведении купольных зданий и сооружений широко используются конструктивно-технологические формы сферических оболочек на основе разрезов Шведлера, Чивитта, Туполева, Павлова. При этом во всех конструктивных решениях куполов просматривается тенденция применения уже на стадии разрезки и формообразования этих покрытий эффективных технологических решений изготовления отдельных элементов, стендовой укрупнительной сборки сегментов куполов, возведения их с обеспечением заданной точности монтажа покрытия в целом или основных его несущих конструкций. Учитывая, что не все возможности разбиения сферы на панели или стержни еще исчерпаны и то, что преобладающее количество сетчатых куполов построено на сфере, дальнейшее рассмотрение вопросов формообразования сетчатых куполов нами проводилось, исходя из построений на сфере.

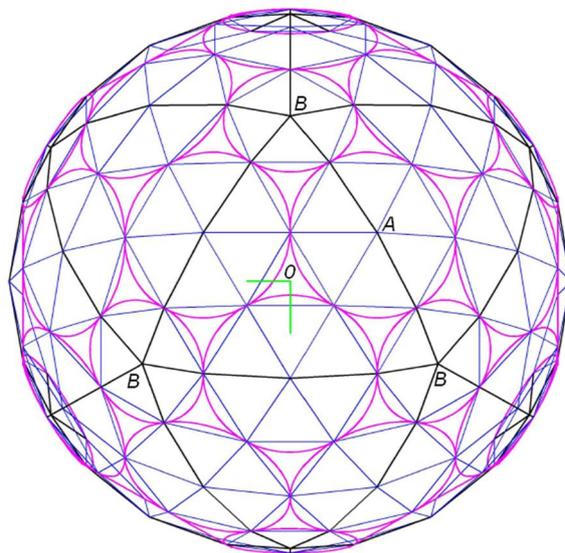
Инновационные конструктивно-технологические формы купольных покрытий в виде сферических оболочек должны обеспечивать реализацию всех выше изложенных принципов и подходов уже на стадии геометрической разрезки сферы. Предлагаемые авторами геометрические схемы членения сферической оболочки разработаны путем использования в качестве исходной основы двух сферических правильных треугольников (так называемых треугольников Мебиуса) – икосаэдрального и октаэдрального. Эти треугольники являются типовыми сегментами любого геодезического купола или сферической оболочки (рис. 1), поэтому при разработке геометрических сетей также использованы указанные треугольники. Многогранники геодезической или кристаллической разрезки имеют оси симметрии (вращения и зеркально поворотные), поэтому для вариантов построения сферических сетей выполнялись разрезки только внутри сегментов граней, составляющих одну шестую часть грани (так называемый сферический треугольник Шварца) икосаэдра (внутренние углы в градусах 36-90-60) или октаэдра (внутренние углы в градусах 45-90-60).

При конструировании куполов критериями оптимальности разрезки могут быть различные факторы, существенно упрощающие процессы монтажа оболочек и облегчающие процесс конструирования. Одним из критериев оптимальности разрезки является минимум типоразмеров основных составляющих оболочки. Кроме этого, для соответствующих условий могут быть и другие критерии, например, максимум числа однотипных монтажных элементов, возможности укрупнительной сборки или максимум эстетического качества по одному или нескольким эстетическим признакам при минимуме сборных деталей. Каждая разновидность разрезки, как геометрическая основа, имеет свои технологические и конструктивные возможности и будет оптимальна только для определенного вида куполов или оболочек. Отсюда следует, что должны быть предложены, рассчитаны и проработаны параметры нескольких типов разрезов, чтобы в конкретной проектной ситуации можно было выбирать тот вариант, который был бы оптимален для конкретного проектируемого здания или сооружения.

Нами предложены и исследованы несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере, которые даются здесь под названием «Гранер». В каждой из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения.

Суть предложенных вариантов разрезов «Гранер» заключается в том, что сборная сферическая оболочка составляется из трех-, пяти-, шестиугольных панелей с углами, лежащими на сфере, т.е. условно на основе геодезической сети. Разнотипные марки таких панелей одинаковым образом расположены в пределах каждой треугольной грани правильного 20-гранника – икосаэдра, вписанного в сферу, и имеют на вершинах 20-гранника панели в виде правильных сферических пятиугольников.

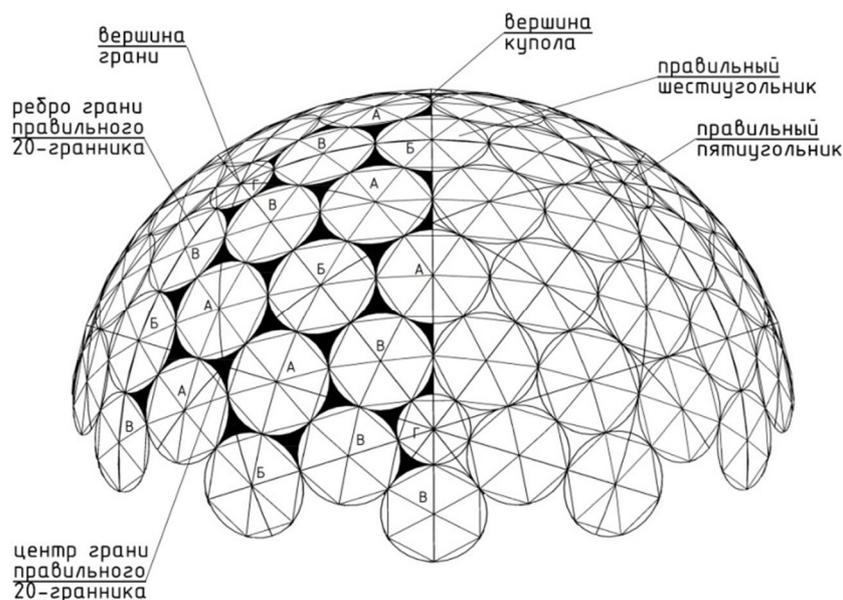
В первом варианте разрезов сферической оболочки (рис. 1-6) панель над центром грани правильного 20-тигранника выполняется в виде правильного треугольника, а над серединой стороны-ребра 20-гранника панель выполняется как правильный сферический или плоский шестиугольник, кроме этого внутри сегментов, ограниченных этими панелями и составляющих одну шестую часть грани правильного 20-тигранника, также выполняются сферические или плоские шестиугольники-панели с центрами, лежащими на сфере, и углами, лежащими на сфере и описанными своими радиусами из соответствующих центров панелей. При этом смежные пяти- или шестиугольники-панели соединены между собой только в одном узле, являющимся одной из точек пересечения или касания окружностей, образующих эти сферические многоугольники-панели, а между каждыми смежными тремя такими панелями образуется треугольная панель. На рисунке 1 изображена сборная сферическая оболочка в виде полного 320-гранника с правильным треугольником-панелью над центром грани  $O$  икосаэдра, над серединой стороны-ребра  $A$  расположен правильный шестиугольник, на вершине  $B$  грани оболочки – правильный пятиугольник. Уже на подоснове в виде 320-гранника, а также у остальных разрезов сферы, полученных одним способом (удвоением числа ребер), и затем оптимизацией параметров, системы координат имеют вершины, немного смещенные относительно геодезической сети.



*Рисунок 1 – Схема сборной сферической оболочки с разрезкой 320-гранника, состоящего из ребер только 4-х типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей и двух треугольных панелей-вставок*

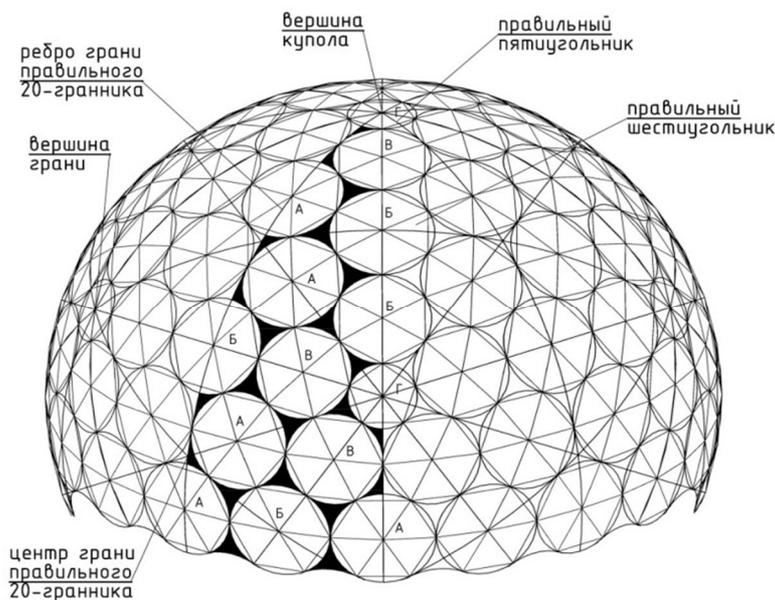
На рисунке 2 показана сборная сферическая оболочка в виде части 1280-гранника с правильным треугольником-панелью над центром грани икосаэдра (вершина купола), над серединой стороны-ребра расположен правильный шестиугольник  $B$ , на вершине грани оболочки – правильный пятиугольник  $\Gamma$ , шестиугольник  $A$  – неправильный, но вписан в окружность

того же радиуса, что и шестиугольник Б. Из множества решений выбрано оптимальное решение разрезки сферы и системы координат, исходя из критерия минимума типоразмеров элементов и сборных панелей.



**Рисунок 2 – Схема сборной сферической оболочки с разрезкой 1280-гранника, состоящего из ребер только 10-ти типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей, двух неправильных шестиугольных панелей и пяти треугольных панелей-вставок**

На рисунке 3 изображена сборная сферическая оболочка в виде части 1280-гранника с правильным треугольником-панелью над центром грани икосаэдра, на вершине грани оболочки – правильный пятиугольник Г (вершина купола).



**Рисунок 3 – Схема сборной сферической оболочки с разрезкой 1280-гранника, состоящего из ребер только 10-ти типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей**

Второй вариант разрезки сферической оболочки отличается тем, что панель над центром грани правильного 20-тигранника выполняется в виде правильного сферического или плоского шестиугольника, а панель над серединой стороны-ребра 20-гранника изготовлена либо как пра-

вильный сферический или плоский шестиугольник, либо здесь, в точке касания окружностей смежных сферических или плоских шестиугольников, расположен их узел соединения.

В третьем варианте разрезов (рис. 1-6) изменяются формы сборных панелей и представлен так, что панели в виде указанных пяти- и шестиугольников выполняют в виде сферических или плоских кругов с точками соединения, лежащими на сфере, описанными своими радиусами из соответствующих центров панелей, причем смежные круги-панели также соединены между собой только в одном узле, являющимся одной из точек пересечения окружностей или в точке касания этих окружностей, образующих эти круги-панели. Между каждыми смежными такими тремя панелями всегда образуется остаточная панель с тремя углами, и узлы соединения выполнены с устройством зазора между панелями-кругами, компенсирующим нахлест окружностей, с заполнением зазора вставками. Если панели-круги выполняются сферическими, то они могут соединяться внахлест, полностью или частично перекрывая участки остаточных панелей сферы.

На рисунке 5, *а* показана разрезка 320-гранника на сфере (эта разрезка начальная базовая, основа приводится с максимальной разрезкой на треугольники), состоящего из ребер только 4-х типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей и двух треугольных панелей-вставок; на рисунке 5, *б* показана разрезка 1280-гранника на сфере, состоящего только из десяти ребер разной длины; на рисунке 5, *в* показана разрезка 5120-гранника на сфере. На рисунке 6, *а* показана разрезка 2000-гранника (на сфере, состоящего из ребер только 12-ти типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей двух неправильных шестиугольных панелей и двух треугольных панелей-вставок; на рисунке 6, *б* показана разрезка 3920-гранника на сфере (обе разрезки начальные базовые).

Для наглядности и оценки влияния точности изготовления элементов на форму купола была выполнена модель сборной сферической оболочки с разрезкой 1280-гранника на сфере (рис. 7).

Применяя каждый способ разбивки, можно поверхность шара расчленить на любое число шестиугольных и треугольных ячеек. Совокупность разрезов, полученных путем применения данного способа разбивки с последующим удвоением, образует семейство или систему разрезов одного вида (например, 320 n2: 320, 1280, 5120).

Для разработки алгоритма геометрического расчета разрезов, предлагаемых конструктивно-технологических систем, воспользуемся повторяемостью параметров сети на любом сферическом треугольнике Шварца (икосаэдра, октаэдра или тетраэдра) и, соответственно, на любом совместимом сферическом треугольнике или в сферическом секторе. При решении указанной проблемы предложены также автоматизированные средства в системах ArchiCAD, AutoCAD и LIRA 9.4, дополненных специальными программными элементами.

На основе разбиения сферы внутри сегментов граней, составляющих одну шестую часть грани (так называемый сферический треугольник Шварца) икосаэдра (внутренние углы треугольника в градусах 36-90-60) составлены базовые сферические структуры, которые предоставляют следующие две системы разбивки оболочки:

- одноконтурная система из плоских или пространственных шести- и пятиугольников с треугольниками между ними (система «20П», рис. 1-7);
- двухконтурная система, состоящая из пяти- и шестигранных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «20ППС», рис. 1-6, 8, 9).

Способы образования треугольных, пятиугольных и шестиугольных сетей обозначены цифровыми и буквенными индексами. Способ «20П» – это такая разбивка, которая позволяет собирать купол из плоских (складчатых, сферических и произвольно пространственных) треугольных, пятиугольных и шестиугольных панелей на основе икосаэдра (см. рис. 1-7). Разрезки способа «20ППС» дают возможность собирать двухъярусной (двухуровневый) купол такой же разрезки, что и у одноъярусных куполов, но из шестиугольных пирамидальных стержневых и пространственных элементов (см. рис. 1-7, 8, 9).

Координаты двух самых эффективных типов разрезки системы «20П», а именно «320-гранник» «1280-гранник» (см. рис. 1, 4), показаны в таблицах 1 и 2.

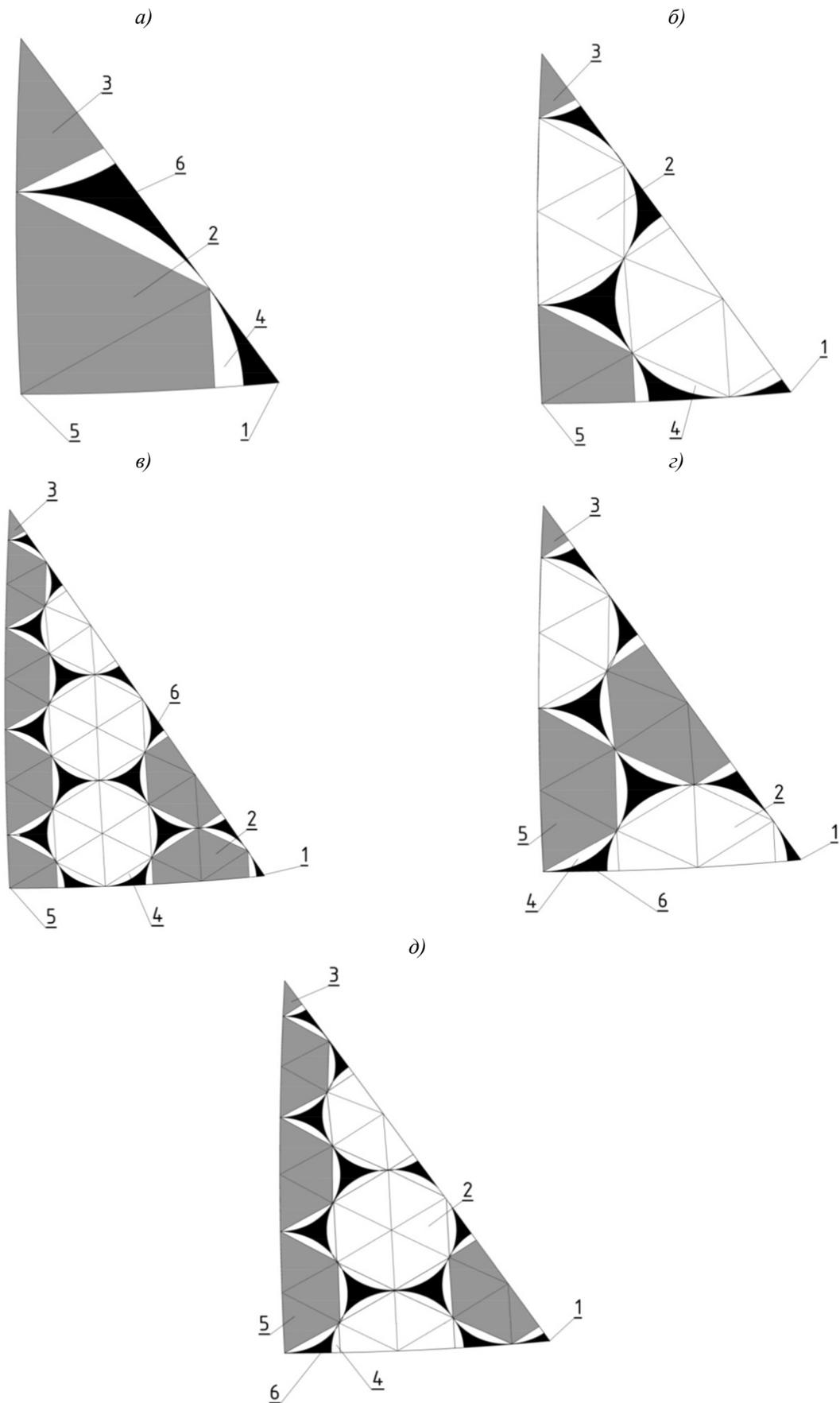
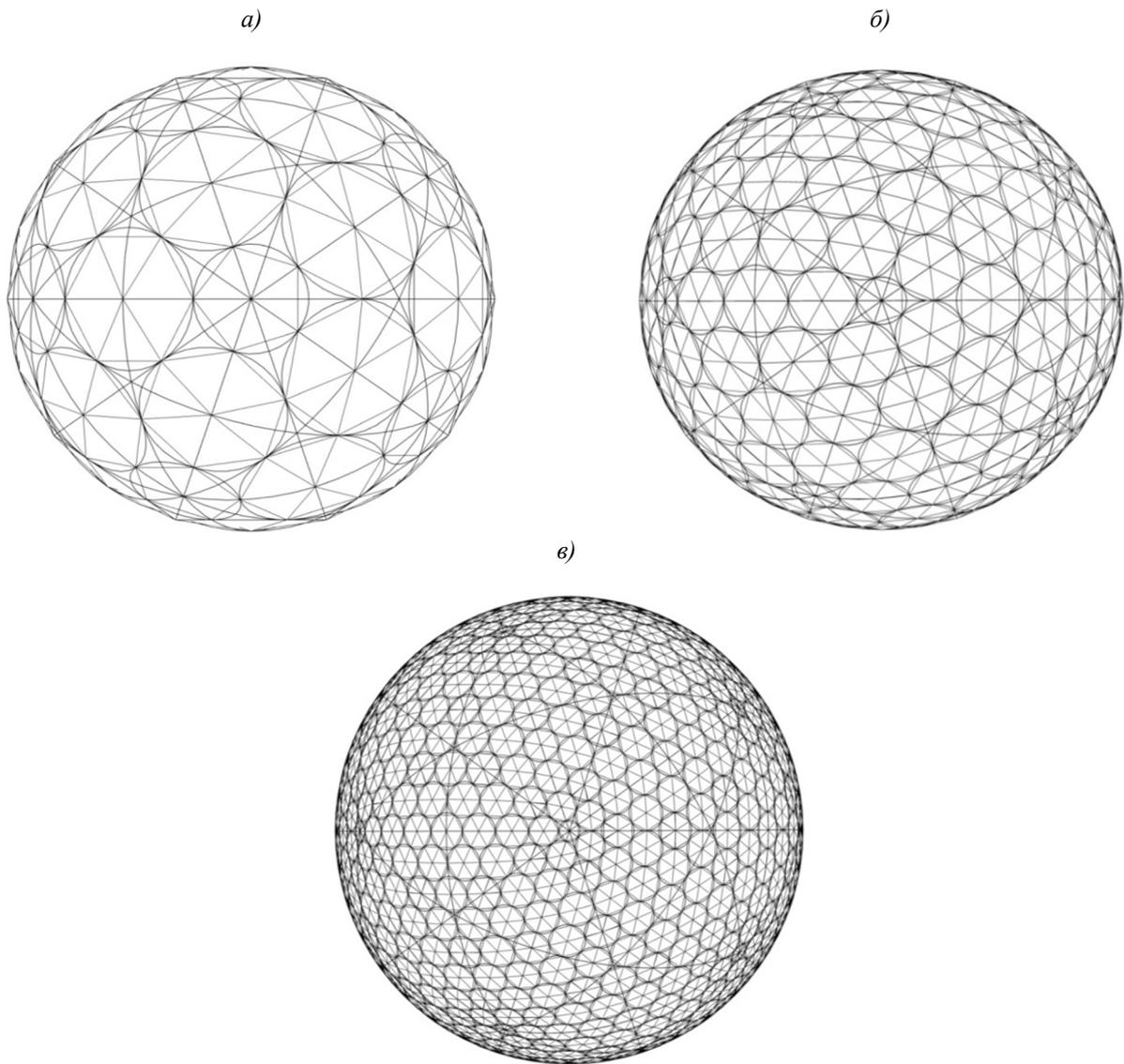
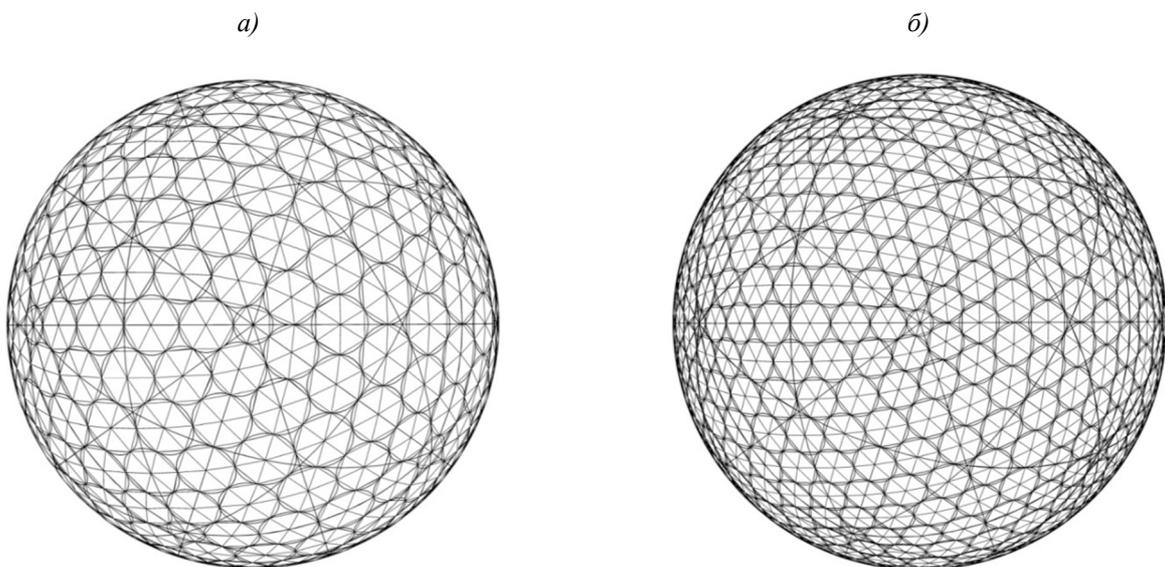


Рисунок 4 – Сегменты сборной сферической оболочки: а – 320-гранника; б – 1280-гранника; в – 5120-гранника; г – 2000-гранник; д – 3920-гранник; 1 – панели в виде правильного треугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде правильного плоского пятиугольника; 4 – панели в виде треугольника; 6 – панели в виде правильных плоских шестиугольников



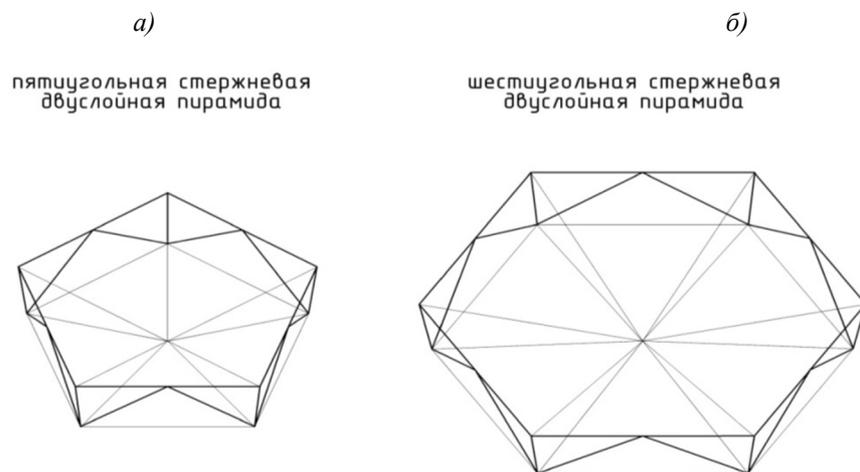
*Рисунок 5 – Схемы разрезов сборной сферической оболочки на основе деления (условно базового) 320-гранника: а – 320-гранник; б – 1280-гранник; в – 5120-гранник*



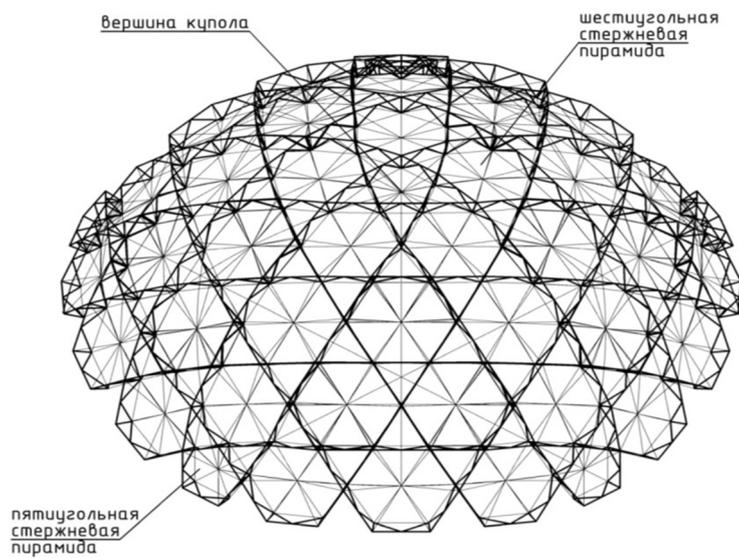
*Рисунок 6 – Схемы базовых разрезов сборной сферической оболочки на основе: а – 2000-гранник; б – 3920-гранник*



*Рисунок 7 – Модель оболочки с разрезкой 1280-гранника на сфере*



*Рисунок 8 – Пирамидальные стержневые панели сборной сферической оболочки:  
а – пятиугольная двухуровневая; б – шестиугольная двухуровневая*



*Рисунок 9 – Схема двухуровневой (двухслойной) разрезки сборной сферической оболочки на основе 1280-гранника*

Таблица 1 – Координаты 320-гранника для диаметра 6 м

№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)	№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)
1	0.000	0.000	0.000	19	1.060502	1.763281	0.816843
2	0.575226	0.417926	0.085476	20	0.178466	2.049871	0.816842
3	-0.21972	0.676219	0.085476	21	-1.34927	1.553481	0.816842
4	-0.71102	0	0.085476	22	-1.89439	0.803176	0.816843
5	-0.21972	-0.67622	0.085476	23	-1.89439	-0.80318	0.816843
6	0.575226	-0.41793	0.085476	24	-1.34927	-1.55348	0.816842
7	1.366445	0	0.329265	25	0.178466	-2.04987	0.816842
8	0.422255	1.299567	0.329265	26	1.060502	-1.76328	0.816843
9	-1.10548	0.803176	0.329265	27	2.004693	-0.46371	0.816842
10	-1.10548	-0.80318	0.329265	28	1.851721	1.345354	1.060631
11	0.422255	-1.29957	0.329265	29	-0.70729	2.176829	1.060631
12	1.275977	0.927051	0.448048	30	-2.28885	0	1.060631
13	-0.48738	1.500000	0.448048	31	-0.70729	-2.17683	1.060631
14	-1.57719	0	0.448048	32	1.851721	-1.34535	1.060631
15	-0.48738	-1.50000	0.448048	33	0.788597	2.427052	1.422808
16	1.275977	-0.92705	0.448048	34	-2.06457	1.50000	1.422808
17	0.575226	0.417926	0.085476	35	-2.06457	-1.50000	1.422808
18	-0.21972	0.676219	0.085476	36	0.788597	-2.42705	1.422808

Классификация разрезов проведена путем буквенной индексации видов разрезов и цифрового обозначения отдельных типов разрезов внутри системы.

Авторами приняты следующие обозначения для различения разрезов на сфере: разрезы на икосаэдральных треугольниках обозначаются цифрой 20, а также одной, двумя или тремя большими буквами («20П», «20ПП», «20ППС», «20Пи» и т.п.), что означает, соответственно, одноярусную, двухярусную или пространственную стержневую системы.

Таблица 2 – Координаты 1280-гранника для диаметра 36 м

№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)	№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)
1	0.000	0.000	0.000	36	3.258396	8.751456	-2.61185
2	-1.31558	-0.95582	-0.0736	37	4.706514	6.658002	-1.95259
3	-0.16997	1.617246	-0.0736	38	6.23007	4.526424	-1.73047
4	1.485558	-0.66141	-0.0736	39	7.78653	2.418732	-1.95259
5	-2.97104	1.322802	-0.29624	40	9.33003	0.39456	-2.61185
6	2.631096	1.9116	-0.29624	41	8.449686	-2.22048	-2.2624
7	0.339948	-3.2344	-0.29624	42	7.304094	-4.79354	-2.2624
8	-4.11644	-1.25003	-0.52166	43	5.949792	-7.19759	-2.61185
9	-1.82549	3.89556	-0.52166	44	3.412746	-7.40497	-1.95259
10	0.975654	4.189968	-0.52166	45	0.80496	-7.65862	-1.73047
11	4.286394	-0.36686	-0.52166	46	-1.79856	-7.95269	-1.95257
12	3.140784	-2.93992	-0.52166	47	-4.32328	-8.27732	-2.61185
13	-2.46091	-3.52868	-0.52166	48	-6.14781	-6.20741	-2.26238
14	-6.78769	-1.45004	-1.39207	49	-7.80336	-3.92875	-2.26238
15	-5.69905	0.995652	-0.95508	50	-11.5071	-1.48318	-4.23817
16	-4.55332	3.569004	-0.95508	51	-10.373	0.706986	-3.30646
17	-3.46426	6.014502	-1.39207	52	-9.27754	2.92806	-2.85557
18	-0.67136	6.387606	-1.1849	53	-8.38388	4.93533	-2.85559
19	2.13804	6.603336	-1.39203	54	-7.46633	7.235622	-3.30647
20	3.71178	4.437702	-0.95508	55	-6.59752	9.54387	-4.23819
21	5.36751	2.158794	-0.95508	56	-3.90807	10.23806	-3.72033
22	6.940836	-0.00715	-1.39203	57	-1.12252	10.68005	-3.55435
23	5.867514	-2.61239	-1.1849	58	1.694052	10.82687	-3.72033
24	4.649634	-5.15327	-1.39203	59	4.469058	10.70701	-4.23819
25	1.987272	-5.43335	-0.95508	60	5.79879	8.629848	-3.30647
26	-0.81419	-5.7278	-0.95508	61	7.174548	6.570594	-2.85559
27	-3.47657	-6.00737	-1.39201	62	8.466066	4.792986	-2.85559
28	-5.19611	-3.77521	-1.18489	63	9.999396	2.848212	-3.30647
29	-9.20815	-1.55387	-2.61184	64	11.56399	0.94167	-4.23819
30	-8.11926	0.746964	-1.95259	65	10.82047	-1.73453	-3.72033
31	-7.03503	3.132198	-1.73047	66	9.81045	-4.3679	-3.55435
32	-5.98795	5.533956	-1.95259	67	8.529318	-6.88054	-3.72033
33	-5.00672	7.882758	-2.61185	68	7.038018	-9.22383	-4.23819
34	-2.30186	8.427888	-2.2624	69	4.574268	-9.33683	-3.30647
35	0.499284	8.722296	-2.2624	70	2.10303	-9.49864	-2.85559

**Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции**

№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)	№ узла	X (м)	Y (м)	Z (м)
71	-0.08219	-9.72832	-2.85559	116	-9.46409	11.87181	-8.3309
72	-2.53305	-10.0838	-3.30647	117	-6.95381	12.94776	-7.6077
73	-4.96645	-10.4855	-4.23817	118	-4.27221	13.70471	-7.14049
74	-6.91236	-8.50352	-3.72031	119	-1.48709	14.14863	-6.97253
75	-8.6879	-6.31215	-3.55433	120	1.32948	14.29348	-7.14049
76	-10.2234	-3.94632	-3.72031	121	4.10985	14.1106	-7.6077
77	-13.4561	-1.24502	-6.10954	122	6.788988	13.58008	-8.33092
78	-12.3957	0.878454	-4.9779	123	8.151354	11.60883	-6.91893
79	-11.0707	2.983194	-4.12416	124	9.301554	9.48771	-5.8565
80	-9.98242	4.444452	-3.69621	125	9.99405	7.26111	-4.9082
81	-9.62473	6.231042	-4.12416	126	11.89768	5.914458	-5.85652
82	-8.94717	8.623998	-4.97792	127	13.55956	4.165074	-6.91893
83	-8.07869	10.83292	-6.10956	128	15.01333	2.260242	-8.33092
84	-5.48275	11.74939	-5.51435	129	14.69	-0.45171	-7.6077
85	-2.71314	12.34096	-5.18051	130	14.00476	-3.15252	-7.14051
86	0.088002	12.63537	-5.18051	131	12.99661	-5.78646	-6.97253
87	2.920086	12.63256	-5.51435	132	11.71379	-8.29811	-7.14051
88	5.64984	12.27586	-6.10956	133	10.16521	-10.6145	-7.60768
89	6.95862	10.29578	-4.97792	134	8.366202	-12.6695	-8.3309
90	8.1189	8.095986	-4.12418	135	5.977872	-12.8637	-6.91891
91	8.840232	6.422796	-3.69623	136	3.565818	-12.7992	-5.85648
92	10.20861	5.219748	-4.12418	137	1.291284	-12.2856	-4.90819
93	11.94221	3.43647	-4.97792	138	-0.82678	-13.2609	-5.85648
94	13.42094	1.579878	-6.10956	139	-3.17272	-13.8255	-6.91889
95	12.91664	-1.12651	-5.51435	140	-5.54926	-14.132	-8.3309
96	12.04416	-3.82084	-5.18051	141	-7.73618	-12.496	-7.60766
97	10.89855	-6.39391	-5.18051	142	-9.73251	-10.5522	-7.14047
98	9.480078	-8.84516	-5.51435	143	-11.5095	-8.36215	-6.97252
99	7.806276	-11.0309	-6.10956	144	-13.0433	-5.99537	-7.14047
100	5.437098	-11.1742	-4.9779	145	-14.275	-3.49605	-7.60766
101	2.951874	-11.0792	-4.12418	146	-16.4955	-0.48906	-10.8125
102	1.142226	-10.8672	-3.69621	147	-15.6426	1.71243	-9.26059
103	-0.58385	-11.4508	-4.12416	148	-14.4043	3.871926	-7.92403
104	-2.995	-12.0605	-4.97792	149	-12.9074	5.746734	-6.84767
105	-5.34224	-12.4128	-6.10954	150	-12.5157	8.113644	-7.92405
106	-7.43387	-10.6229	-5.51434	151	-11.7395	10.47886	-9.2606
107	-9.331	-8.52012	-5.18049	152	-10.6742	12.58574	-10.8125
108	-10.9865	-6.24146	-5.18049	153	-8.25356	13.82713	-9.95706
109	-12.4001	-3.7874	-5.51434	154	-5.6576	14.74358	-9.36189
110	-15.1552	-0.9106	-8.3309	155	-3.02571	15.31332	-9.03634
111	-14.1292	1.25487	-6.91889	156	-0.22424	15.60776	-9.03634
112	-12.8674	3.31155	-5.85648	157	2.468592	15.59768	-9.36191
113	-11.2853	5.024538	-4.90819	158	5.198364	15.241	-9.95708
114	-11.0709	7.346466	-5.8565	159	7.824204	14.53001	-10.8125
115	-10.3868	9.660384	-6.91891	160	9.304308	12.69067	-9.26062

Таблица координат «320-гранника» дана для сферы диаметром 6 м, а «1280-гранника» – для сферы диаметром 36 м позволяет вычертить основные архитектурно-строительные чертежи покрытия здания, монтажные схемы и их фрагменты в любом ракурсе, выполнить конструирование купола, а также все статические и динамические расчеты.

На рисунке 10 приведен пример спроектированного купольного покрытия и продемонстрирована методика определения размеров сборных деталей и монтажных схем с помощью таблиц координат. По приведенным рисункам и схемам можно получить визуальное представление о специфических композиционных и строительных различиях существующих геодезических оболочек и предлагаемых конструктивно-технологических форм сферических оболочек, имеющих другие геометрические основы.



*Рисунок 10 – Запроектированное сборное сферическое покрытие аквапарка  
пролетом 36 м на основе 1280-гранника*

**Выводы.** Разработанные сборные сферические оболочки системы «Транер» могут применяться для покрытий зданий различного назначения, а также для устройства сферических отражателей в зеркальных антеннах и концентраторах энергии. По сравнению с аналогами эти оболочки имеют максимум однотипных монтажных элементов, возможности укрупнительной сборки и максимум эстетического качества при минимуме сборных деталей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, Г.Н. Композиционное формообразование кристаллических куполов и оболочек [Текст] / Г.Н. Павлов // Архитектура СССР. – 1977. – №7. – С. 32.
2. Туполев, М.С. Геометрия сборных сферических куполов [Текст] / М.С. Туполев // Архитектура СССР. – 1969. – №1.

**Травуш Владимир Ильич**

Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН), г. Москва  
Доктор технических наук, профессор, академик, вице-президент РААСН  
E-mail: travush@mail.ru

**Антошкин Василий Дмитриевич**

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Архитектура»  
E-mail: antovd@mail.ru

**Ерофеев Владимир Трофимович**

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
Доктор технических наук, профессор, декан архитектурно-строительного факультета  
E-mail: antovd@mail.ru

**Гудожников Сергей Степанович**

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
Аспирант кафедры «Строительные материалы и технологии»

---

V.I. TRAVUSH, V.D. ANTOSHKIN, V.T. EROFEEV,  
S.S. GUDOZHNIKOV

### MODERN CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF SPHERICAL SHELLS

*The problems of constructive and technology forming of spherical shells are based on geodetic network. Several design and technological methods of education triangular area networks, which have*

*been called «Traner» are investigated. In each of these optimal criterion is the minimum number of standard sizes of structural components and the minimal number of components from the dome, the possibility of pre-assembly and pre-tension.*

**Keywords:** *team spherical shell, constructive and technological forms, panel, a regular hexagon, cutting the dome.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Pavlov, G.N. Kompozicionnoe formoobrazovanie kristallicheskih kupolov i obolochek [Tekst] / G.N. Pavlov // Arhitektura SSSR. – 1977. – №7. – S. 32.
2. Tupolev, M.S. Geometrija sbornyh sfericheskikh kupolov [Tekst] / M.S. Tupolev // Arhitektura SSSR. – 1969. – №1.

### **Travush Vladimir Iljich**

Russian academy of architecture and construction sciences, Moscow  
Doctor of technical science, professor, academician RAABS, vice-president RAABS  
E-mail: travush@mail.ru

### **Antoshkin Vasilij Dmitrievich**

Mordovian state university, Saransk  
Candidate of technical science, assistant professor, head of department «Architecture»  
E-mail: antovd@mail.ru

### **Erofeev Vladimir Trofimovich**

Mordovian state university, Saransk  
Doctor of technical science, professor, dean of the faculty of architecture and building.  
E-mail: antovd@mail.ru

### **Gudozhnikov Sergei Stepanovich**

Mordovian state university, Saransk  
Post-graduate student of department «Construction materials and technologies»

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ АДАПТАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАМ К ЗАПРОЕКТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

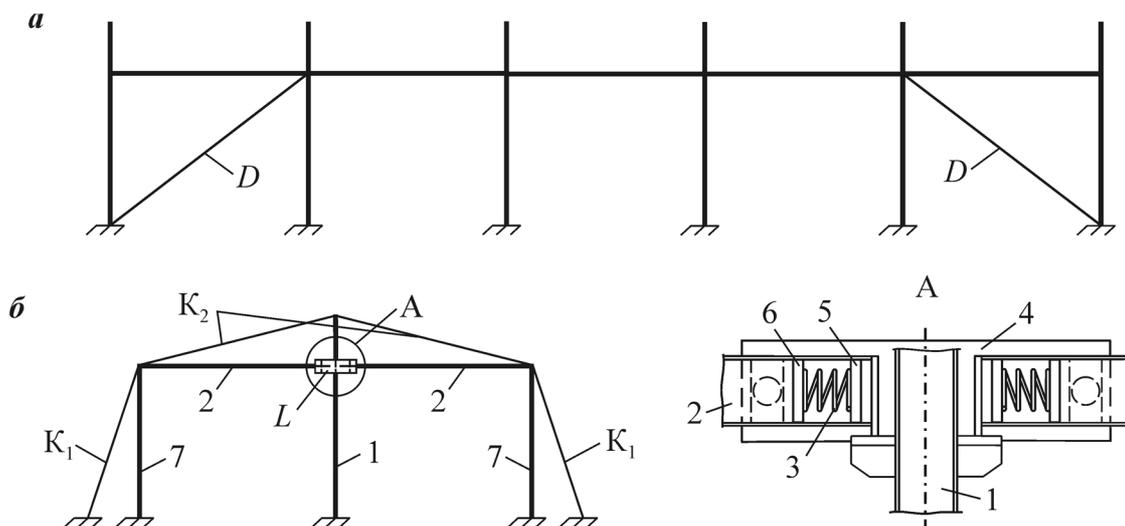
*Разрабатывается методика поиска эффективных параметров устройств, обеспечивающих приспособление металлических рам к возможным локальным разрушениям. Задача сводится к минимизации максимальных усилий в страховочных канатах. Расчет повреждаемых конструкций выполняется в динамической постановке с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей поведения деформируемых объектов. Работоспособность предлагаемой методики иллюстрируется на примере нахождения рациональных параметров системы адаптации металлической поперечной рамы одноэтажного здания.*

**Ключевые слова:** *запроектные воздействия, адаптивные системы, динамика, нелинейность, рациональные параметры.*

В настоящее время большое внимание уделяется вопросу обеспечения живучести зданий и сооружений в условиях запроектных воздействий [1-4]. Одним из направлений решения этой проблемы является разработка несущих строительных систем, снабженных устройствами адаптации к локальным повреждениям [5-7]. Такие устройства должны обеспечивать эффективное перераспределение усилий между элементами конструкции в случае выключения из работы отдельных внутренних или внешних связей.

Важным этапом проектирования адаптивных систем является рациональный выбор их конструктивных параметров. В данной работе рассматривается вопрос построения методики поиска рациональных значений параметров адаптивных устройств металлических плоских рам. Предусматривается использование в таких системах механизмов структурной перестройки и страховочных канатов.

В качестве примера реализации данного подхода к повышению живучести конструкций приведем схему каркаса одноэтажного здания [7] (рис. 1). В узлах соединения средних стоек 1 поперечных рам каркаса с балками 2 вводятся устройства адаптации  $L$ . В этих устройствах используются пружины 3, пластины 4, ребра жесткости 5 балок, упоры 6. Упоры шарнирно связаны с пластинами. Каждая поперечная рама каркаса снабжена страховочными канатами  $K_1$  и  $K_2$ . Для обеспечения продольной жесткости каркаса предусмотрены связи  $D$ .



**Рисунок 1 – Металлический каркас здания повышенной живучести:**  
*а – вид каркаса сбоку; б – поперечная рама*

При внезапном разрушении опоры средней стойки 1 образуется изменяемая система, в которой стойка смещается по вертикали со сжатием пружин. На рисунке 2 проиллюстрировано состояние системы  $L$  при максимальной сжатии пружин. При этом фактически получается пролетный объект, работающий на изгиб с распором. В восприятии распора участвуют канаты  $K_1$ . В случае разрушения опоры крайней стойки 7 поперечной рамы перераспределение вертикальных сил реализуется с помощью канатов  $K_2$ .

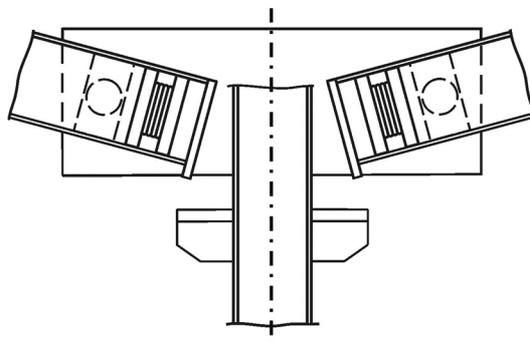


Рисунок 2 – Замыкание пружин в узле соединения средней стойки и балок поперечной рамы

При рассмотрении объектов такого типа полагаем, что структурная перестройка обеспечивает геометрическую неизменяемость вновь образованной деформированной системы. Допускаем возникновение пластических деформаций в основных несущих элементах каркаса. Как показывают расчеты таких объектов, при внезапном удалении отдельных опор условием сохранения конструкции от полного разрушения является обеспечение прочности страховочных канатов. В связи с этим поставим экстремальную задачу:

$$t_{i_{\max}}(X) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $t_{i_{\max}}$  – максимальная из величин  $t_i = T_i/T_{i_{\text{пред}}}$  ( $i=1, \dots, i_0$ );  $T_i$  – наибольшее во времени усилие, достигаемое в  $i$ -м канате или  $i$ -й группе канатов с учетом всех рассматриваемых возможных запроектных воздействий;  $T_{i_{\text{пред}}}$  – принимаемое предельное значение  $T_i$ ;  $i_0$  – число канатов;  $X$  – множество варьируемых параметров.

В качестве ограничений принимаются условия:

$$x_{ja} \leq x_j \leq x_{jb} \quad (j=1, \dots, j_0); \quad (2)$$

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{пред}}, \quad (3)$$

где  $x_j$  – значение  $j$ -го варьируемого параметра;  $x_{ja}$ ,  $x_{jb}$  – минимально и максимально допустимые значения этого параметра;  $j_0$  – число варьируемых параметров;  $\varepsilon$  – линейная деформация растяжения материала стержней;  $\varepsilon_{\text{пред}}$  – задаваемое предельное значение данной деформации.

При этом не накладываем ограничений на величины перемещений.

По результатам решения поставленной задачи можно сделать вывод о возможности обеспечения живучести объекта для принятой системы адаптации.

При  $j_0 > 1$  нахождение экстремальных решений будем осуществлять с использованием метода симплексного поиска Нелдера-Мида [8]. Данный алгоритм начинается с построения исходного симплекса в пространстве независимых переменных и оценивания значений целевой функции в каждой из вершин симплекса. При этом определяется вершина, которой соответствует наибольшее значение целевой функции. Затем найденная вершина проецируется через центр тяжести с остальных вершин симплекса в точку, используемую в качестве вершины нового симплекса (рис. 3). После отражения определяется новое значение целевой функции. Если эта величина оказывается больше минимального значения целевой функции для вершин симплекса, то осуществляется сжатие путем уменьшения шага перемещения точки в направлении отражения. Итерации продолжаются до тех пор, пока изменения значений целевой функции в вершинах симплекса не станут незначительными.

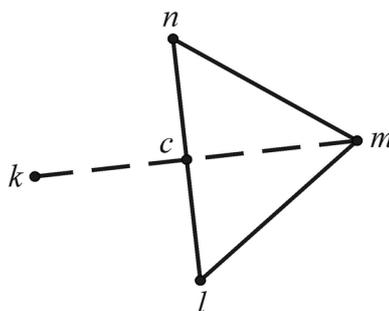


Рисунок 3 – Пример получения новой точки  $k$  на плоскости:  $lmp$  – рассматриваемый симплекс;  $m$  – вершина с наибольшим значением целевой функции

Такую процедуру при определении новой точки  $k$  на плоскости можно записать в виде:

$$\vec{X}_k = \vec{X}_m + (1 + \alpha) \left( \frac{\vec{X}_n + \vec{X}_l}{2} - \vec{X}_m \right), \quad (4)$$

где  $\vec{X}_k$ ,  $\vec{X}_m$ ,  $\vec{X}_n$ ,  $\vec{X}_l$  – числовые векторы координат соответствующих точек;  $\alpha=1$  при простом отражении и  $-1 < \alpha < 1$  при сжатии.

С целью ускорения сходимости может использоваться значение  $\alpha > 1$ .

Для каждой из точек симплекса необходимо выполнить расчеты объекта при рассматриваемых запроектных воздействиях с учетом геометрической, физической и конструктивной нелинейностей. Анализ деформаций плоской рамы в такой постановке будем выполнять с помощью методики работы [9]. Согласно этому алгоритму для динамического анализа стержневой системы используется метод конечных элементов в форме метода перемещений. Система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамическое поведение объекта, решается путем численного интегрирования с использованием предпосылки метода Ньюмарка о постоянных значениях ускорений на каждом шаге интегрирования [10]. Учет физически нелинейного поведения стержневой системы обеспечивается введением узлов, в которых предусматривается возможность образования пластических шарниров. Считается, что на участках стержневой между пластическими шарнирами материал работает в упругой стадии, а для каждого пластического шарнира приближенно реализуется схема идеального упругопластического деформирования. Учет геометрической нелинейности осуществляется путем пересчета координат узловых точек на каждом шаге численного интегрирования и использования геометрических матриц конечных элементов [11]. В качестве конструктивно нелинейных элементов в расчетной схеме рассматриваются односторонние затяжки.

Проиллюстрируем использование рассматриваемого подхода к выбору параметров систем адаптации на примере представленной на рисунке 1, б конструкции симметричной двухпролетной рамы каркаса одноэтажного здания повышенной живучести. Считаем, что рама имеет жесткие опорные связи и жесткие соединения балок покрытия с крайними стойками, а на среднюю стойку балки опираются свободно. Рама раскреплена из своей плоскости прогонами П и распорками РП (рис. 4).

Материал стержневой рамы – сталь с пределом текучести  $\sigma_T=325$  МПа, модулем упругости  $E=2,06 \cdot 10^5$  МПа, плотностью  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>. Стойки выполнены из двутавра №30К2 по ГОСТ 26020-83, балки – из двутавра №35Ш2 по ГОСТ 26020-83. Канаты изготовлены по ГОСТ 7675-73 и имеют расчетное разрывное усилие  $R=1670$  кН. Пластины устройств адаптации выполнены из стальных листов размерами  $1,2 \times 0,3 \times 0,03$  м. В работе [12] показано, что при мгновенном выключении из металлических рам такого типа отдельных стоек скорость деформирования конструкции несущественно влияет на работу материала. Поэтому для стержневой рамы принимаем динамический предел текучести стали  $\sigma_{Td}=\sigma_T$ , для канатов – динамическое разрывное усилие  $R_d=R$ . В соответствии с рекомендациями СП 20.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* «Нагрузки и воздействия») вводились равномерно распределенные нагрузки  $q_{c1}$ ,  $q_{c2}$ ,  $q_6$  от действия сил тяжести элементов рамы, передаваемые через

прогоны нагрузки  $P_1=18$  кН,  $P_2=36$  кН от сил тяжести покрытия и снега, нагрузки  $P_3=28$  кН от сил тяжести стеновых панелей. Силы  $P_3$  прикладывались с эксцентриситетом  $e=310$  мм.

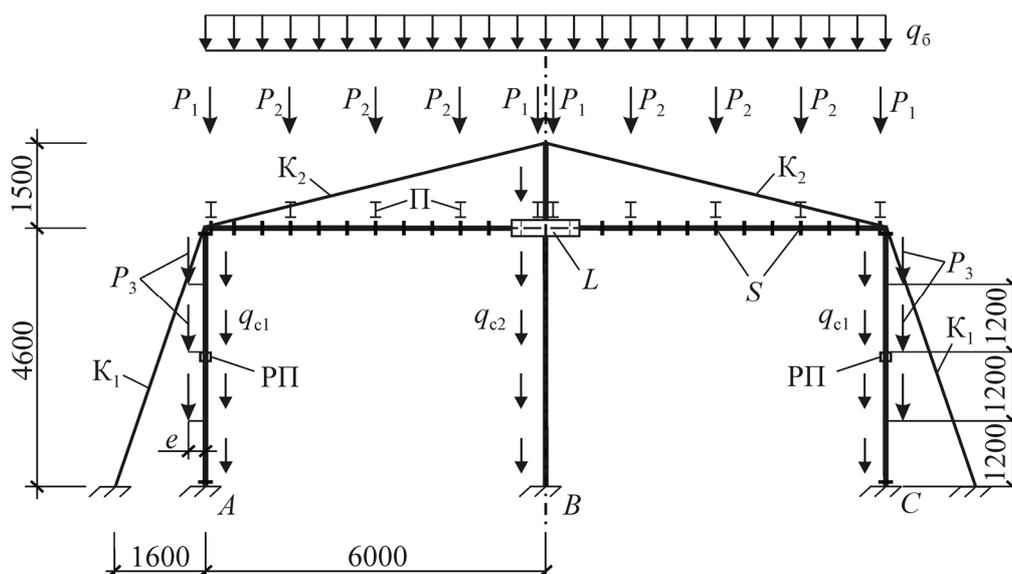


Рисунок 4 – Схема действия сил и расположение сечений  $S$  для поперечной рамы

Проводился динамический анализ рамы при внезапном разрушении средней опоры  $B$  и крайней опоры  $C$ . Стойки и балки рамы разбивались на стержневые конечные элементы длиной  $0,5$  м. Каждый канат моделировался одним конечным элементом. В сечениях  $S$  предусматривалась возможность образования пластических шарниров.

В качестве варьируемых параметров рассматривались жесткость  $c$  и максимальное сжатие  $s$  пружин устройства адаптации. Для этих параметров принималась следующая область интереса:  $30 \leq c \leq 10000$  кН/м,  $10 \leq s \leq 250$  мм. В данной области выбиралась группа пробных точек (рис. 5), для каждой из которых выполнялся динамический анализ исследуемого объекта с определением максимальных усилий натяжения  $T_1$ ,  $T_2$  в канатах  $K_1$ ,  $K_2$ . При этом во всех расчетах получалось  $t_2 < 1$ . Поэтому оптимизация выполнялась по значению  $T_1$ . На рисунке 5 приведены полученные величины усилий  $T_1$ .

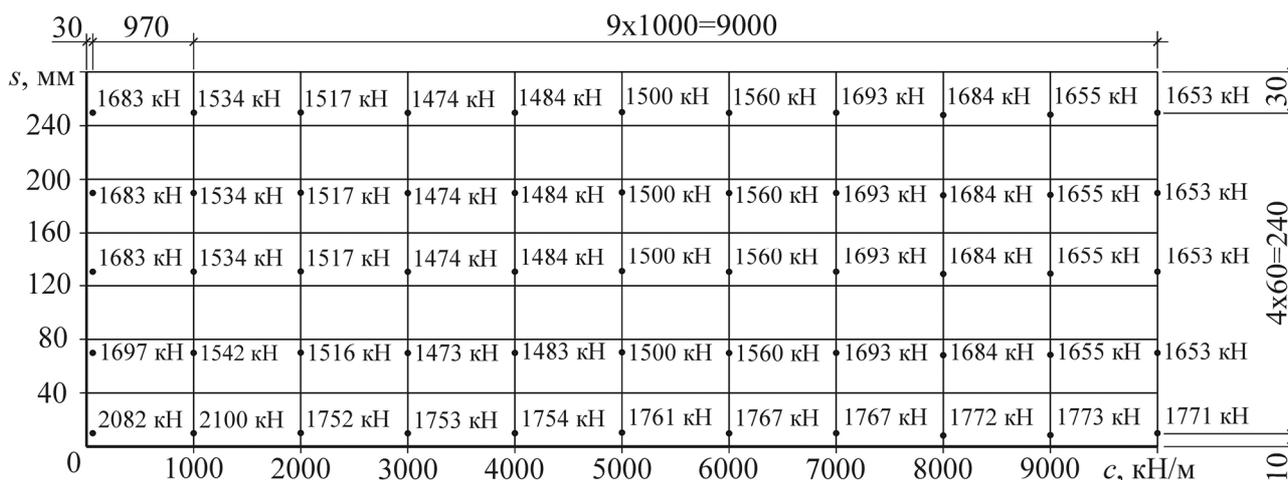


Рисунок 5 – Пробные точки области интереса с результатами нахождения максимальных усилий в канатах  $K_1$

Затем выполнялась процедура поиска при помощи симплекса в подобласти с наименьшими значениями  $T_1$  (рис. 6). Первоначально задавался треугольник с вершинами  $x^{(1)}(3300; 60)$ ,  $x^{(2)}(3200; 40)$ ,  $x^{(3)}(3400; 50)$ . После этого последовательно осуществлялось движение в порядке возрастания номеров точек. При этом вершины 4, 5, 7, 8 получались путем простого от-

ражения, а вершины 6, 9 – путем сжатия при  $\alpha=0,5$ . Значения максимальных усилий в канатах  $K_1$  приведены в таблице. Поиск был прекращен в точке  $x^{(9)}(3144; 41,9)$  в связи с несущественной разницей величин  $T_1$  в вершинах последнего симплекса (4-7-9). Минимальное значение усилия  $T_1$  получилось в вершине 7. При этом  $t_1=0,87$ .

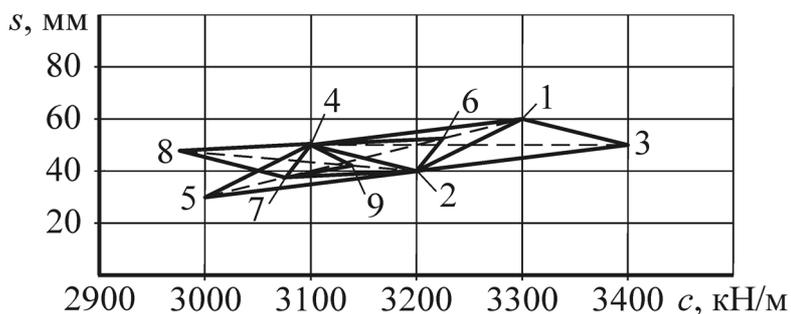


Рисунок 6 – Схема реализации метода симплексного поиска: 1-9 – вершины симплексов

Таблица – Значения  $T_1$  в вершинах симплексов

$T_1$ , кН в точке								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1472	1467	1477	1449	1728	1471	1446	1467	1448

На рисунке 7 представлены деформированные схемы рамы при удалении опор  $B$  и  $C$  для наиболее рациональных параметров адаптивной системы. Здесь сплошными линиями показаны исходные расположения элементов конструкции, штриховыми – деформированные состояния при достижении максимального прогиба в балке. Штрихпунктирными линиями условно обозначены канаты, не работающие при запроектном воздействии на растяжение. Максимальный прогиб в балке при разрушении опоры  $B$  соответствует моменту времени  $t=2,37$  с, при разрушении опоры  $C-t=1,23$  с. При мгновенном удалении опоры  $B$  в сечениях  $H$  образуются пластические шарниры. В случае удаления опоры  $C$  рама деформируется без возникновения пластических шарниров.

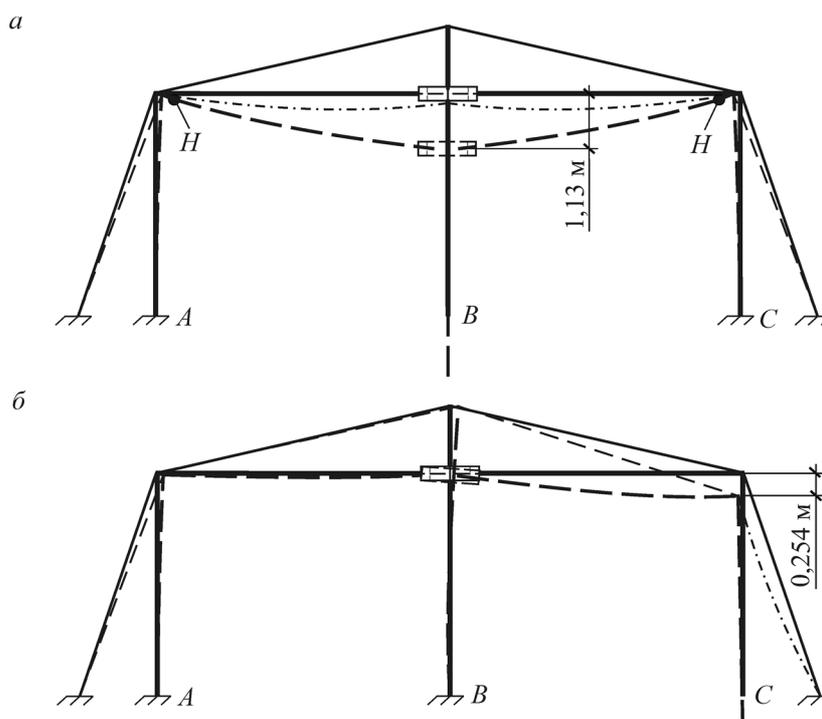


Рисунок 7 – Деформирование рамы при удалении опор  $B$  (а) и  $C$  (б)

### Заключение

Предложена процедура выбора рациональных параметров адаптивных устройств, которые обеспечивают перераспределение нагрузок при запроектных воздействиях на металлические рамы, вызывающих местные повреждения несущих систем. На конкретном примере поперечной рамы каркаса одноэтажного здания показана возможность снижения с помощью данного алгоритма динамических усилий в страховочных канатах при разрушении отдельных опор конструкции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов, В.И. Основные направления развития конструктивных решений и обеспечение безопасности жилища [Текст] / В.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №10. – С. 12-15.
2. Гордон, В.А. Расчет динамических усилий в конструктивно-нелинейных элементах стержневых пространственных систем при внезапных структурных изменениях [Текст] / В.А. Гордон, Н.В. Клюева, Т.В. Потуралева, А.С. Бухтиярова // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2008. – №6. – С. 26-30.
3. Клюева, Н.В. К анализу живучести внезапно поврежденных рамных систем [Текст] / Н.В. Клюева, В.С. Федоров // Строительная механика и расчет сооружений. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2006. – №3. – С. 7-13.
4. Кудишин, Ю.И. Живучесть строительных конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварий [Текст] / Ю.И. Кудишин, Д.Ю. Дробот // Металлические конструкции. – 2009. – №1. – С. 61-72.
5. Пат. № 2360076 Российская Федерация, МПК E04B 1/24. Рамный каркас здания повышенной надежности [Текст] / И.Н. Серпик, А.А. Лелетко, А.В. Алексейцев; заявитель и патентообладатель БрянГИТА. – заявл. 12.02.2008; опубл. 27.06.2009, Бюл. № 18. – 5 с.
6. Пат. № 2426840 Российская Федерация, МПК E04B 1/24. Каркас здания повышенной живучести [Текст] / И.Н. Серпик, А.В. Алексейцев; заявитель и патентообладатель БрянГИТА. – заявл. 03.03.2010; опубл. 20.08.2011, Бюл. № 23. – 9 с.
7. Пат. № 2466243 Российская Федерация, МПК E04B 1/24. Многопролетная двухэтажная поперечная рама каркаса здания [Текст] / И.Н. Серпик, А.В. Алексейцев, Н.С. Курченко; заявитель и патентообладатель БрянГИТА. – заявл. 14.04.2011; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31. – 14 с.
8. Deb, K. Optimization for engineering design [Text] / K. Deb. – New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2005. – 383 p.
9. Серпик, И.Н. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях [Текст] / И.Н. Серпик, Н.С. Курченко, А.В. Алексейцев, А.А. Лагутина // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – №10. – С. 49-51.
10. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Бате, Е. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
11. Zienkiewicz, O.C. The finite element method [Text] / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor // Fifth edition: The basic. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – Vol. 1. – 689 pp.
12. Лелетко, А.А. Эволюционная оптимизация балок и рам с учетом внезапных структурных изменений: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.А. Лелетко. – Орел, 2010. – 152 с.

#### Серпик Игорь Нафтольевич

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика»  
Тел.: +7 (910) 337-46-81  
E-mail: iserpik@online.debryansk.ru

#### Курченко Наталья Сергеевна

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Аспирант кафедры «Механика»  
Тел.: +7 (920) 602-32-40  
E-mail: ms.kurchenko@mail.ru

I.N. SERPIK, N.S. KURCHENKO

### ABOUT DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS FOR ADAPTIVE SYSTEMS OF STEEL FRAMES TO EMERGENCY ACTIONS

*The method to search of effective parameters for systems, which provide adaptation of steel frames to possible local damages is developed. This problem solves using a minimization of the maximum tension forces in safety ropes. The dynamic analysis of damaged structures is performed with taking into account material, geometrical and structural nonlinearities behavior of deformed systems. The working capacity of the proposed method is illustrated by finding rational parameters for the adaptive system of the steel transverse frame of the one-storey building.*

**Keywords:** emergency actions, adaptive systems, dynamics, nonlinearity, rational parameters.

### BIBLIOGRAPHY

1. Kolchunov, V.I. Osnovnye napravlenija razvitiya konstruktivnyh reshenij i obespechenie bezopasnosti zhilishha [Tekst] / V.I. Kolchunov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2007. – №10. – S. 12-15.
2. Gordon, V.A. Raschet dinamicheskikh usilij v konstruktivno-nelinejnyh jelementah sterzhnevnyh prostranstvennyh sistem pri vnezapnyh strukturnyh izmenenijah [Tekst] / V.A. Gordon, N.V. Kljueva, T.V. Poturaeva, A.S. Buhtijarova // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2008. – №6. – S. 26-30.
3. Kljueva, N.V. K analizu zhivuchesti vnezapno povrezhdennyh ramnyh sistem [Tekst] / N.V. Kljueva, V.S. Fedorov // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – M.: FGUP «NIC «Stroitel'stvo». – 2006. – №3. – S. 7-13.
4. Kudishin, Ju.I. Zhivuchest' stroitel'nyh konstrukcij – vazhnyj faktor snizhenija poter' v uslovijah avarij [Tekst] / Ju.I. Kudishin, D.Ju. Drobot // Metallicheskie konstrukcii. – 2009. – №1. – S. 61-72.
5. Pat. № 2360076 Rossijskaja Federacija, MPK E04V 1/24. Ramnyj karkas zdaniya povyshennoj nadezhnosti [Tekst] / I.N. Serpik, A.A. Leletko, A.V. Aleksejcev; zajavitel' i patentoobladatel' BrjanGITA. – zajavl. 12.02.2008; opubl. 27.06.2009, Bjul. № 18. – 5 s.
6. Pat. № 2426840 Rossijskaja Federacija, MPK E04V 1/24. Karkas zdaniya povyshennoj zhivuchesti [Tekst] / I.N. Serpik, A.V. Aleksejcev; zajavitel' i patentoobladatel' BrjanGITA. – zajavl. 03.03.2010; opubl. 20.08.2011, Bjul. № 23. – 9 s.
7. Pat. № 2466243 Rossijskaja Federacija, MPK E04V 1/24. Mnogoproletnaja dvuhjetazhnaja poperechnaja rama karkasa zdaniya [Tekst] / I.N. Serpik, A.V. Aleksejcev, N.S. Kurchenko; zajavitel' i patentoobladatel' BrjanGITA. – zajavl. 14.04.2011; opubl. 10.11.2012, Bjul. № 31. – 14 s.
8. Deb, K. Optimization for engineering design [Text] / K. Deb. – New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2005. – 383 p.
9. Serpik, I.N. Analiz v geometricheski, fizicheski i konstruktivno nelinejnoj postanovke dinamicheskogo povedenija ploskih ram pri zaproektnyh vozdeystvijah [Tekst] / I.N. Serpik, N.S. Kurchenko, A.V. Aleksejcev, A.A. Lagutina // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2012. – №10. – S. 49-51.
10. Bate, K. Chislennye metody analiza i metod konechnykh jelementov [Tekst] / K. Bate, E. Vilson. – M.: Strojizdat, 1982. – 448 s.
11. Zienkiewicz, O.C. The finite element method [Text] / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor // Fifth edition: The basic. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – Vol. 1. – 689 pp.
12. Leletko, A.A. Jevoljucionnaja optimizacija balok i ram s uchetom vnezapnyh strukturnyh izmenenij: dis. ... kand. tehn. nauk [Tekst] / A.A. Leletko. – Orel, 2010. – 152 s.

#### **Serpik Igor Naftolevich**

Bryansk state technological academy of engineering, Bryansk  
Doctor of technical science, head of department «Mechanics»  
Ph.: +7 (910) 337-46-81  
E-mail: iserpik@online.debryansk.ru

#### **Kurchenko Natalya Sergeevna**

Bryansk state technological academy of engineering, Bryansk  
Post-graduate student of department «Mechanics»  
Ph.: +7 (920) 602-32-40  
E-mail: ms.kurchenko@mail.ru

ФЕДОРОВ В.С., ГРАМИНОВСКИЙ Н.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПРИ НАГРЕВЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОГНЕСТОЙКОСТИ

*В работе приведены результаты испытаний и обработки результатов экспериментальных исследований высокопрочного бетона на высокотемпературное воздействие. На основании обработки экспериментальных данных построены кривые деформирования бетона при нестационарном нагреве с учетом силового воздействия и определены деформации температурного расширения бетона, включая усадку. Построены изотермические диаграммы деформирования бетона при нагреве. Определены аналитические зависимости изменения прочностных и деформативных характеристик бетона при нагреве.*

*Ключевые слова:* высокопрочный бетон, огнестойкость, изотермические диаграммы деформирования.

В настоящее время в строительстве все более широкое применение получают высокопрочные бетоны, однако данные по изменению их характеристик при нагреве, необходимые для расчетной оценки огнестойкости конструкций, выполненных на основе таких бетонов, не совсем достаточны. В работе [3] разработана модель термосилового деформирования бетона с учетом его высокотемпературного нагрева.

Аналитическая связь  $\sigma$ - $\varepsilon$  термомеханического состояния бетона включает: коэффициент снижения прочности  $\gamma_{b,ti}$ , учитывающий температуру его нагрева:

$$\gamma_{b,ti} = \exp \left[ -\gamma \cdot \left( \frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^m \right],$$

коэффициент снижения начального модуля деформаций  $\beta_{b,ti}$ , учитывающий температуру его нагрева:

$$\beta_{b,ti} = \exp \left[ -\beta \cdot \left( \frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^n \right],$$

температурные деформации:

$$\varepsilon_{b,ti}^{(tem)} = \varepsilon_{\alpha} \cdot \left[ 1 - \exp \left[ -\alpha \cdot \left( \frac{t_{b,i} - t_0}{1000} \right)^p \right] \right],$$

где  $t_0$  – температура бетона до нагрева ( $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $m$ ,  $n$  – опытные параметры; 1000 – размерный коэффициент. Опытные значения коэффициентов  $\gamma$ ,  $m$ ,  $\beta$ ,  $n$  зависят от класса бетона и определяются по результатам экспериментальных исследований.

В данной работе представлены результаты исследований физико-механических характеристик высокопрочных бетонов при высокотемпературном нагреве.

Образцы изготавливались в виде полых цилиндров высотой 300 мм, наружный диаметр 75 мм, толщина стенок 25 мм [1]. Исследования деформирования бетонных образцов при высокотемпературном нестационарном нагреве проводились по методике ВНИИПО [2]. Нагрев стенок цилиндра с наружной и внутренней граней осуществлялся в муфельной печи, выполненной из шамотного кирпича и огнеупорной глины. В качестве нагревателя служила нихромовая проволока диаметром 0,6 мм. Скорость нагрева образцов составляла 5-7 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Деформации бетонных образцов измерялись через специальные удлинители при помощи механического индикатора часового типа TESA YE, ЦД 0,01 мм. Образцы-цилиндры изготавливались из бетонов классов В40 и В80 следующего состава в пересчете на 1 м<sup>3</sup> смеси:

Таблица 1 – Состав бетонов

№ п/п	Наименование заполнителя	Количество на 1 куб. м	
		В80	В40
1	Цемент, кг	497	480
2	Модификатор МБ 10-01, кг	99 (20% от массы Ц)	77 (16% от массы Ц)
3	Песок, кг	447	448
4	Щебень фракции 5-10, кг	477	477
5	Вода, кг	165	163
6	Добавка СНВ, кг	7,5 (0,015 от массы Ц)	14,4 (0,03 от массы Ц)

Для каждого класса бетона было проведено 4 серии испытаний по 5-6 образцов в каждой серии. Для каждой серии испытаний принят свой уровень нагружения  $\eta_{\sigma,0}=0, 0,3, 0,5$  и  $0,7$  от разрушающей нагрузки.

На рисунке 1 представлены кривые деформирования бетонных образцов при нестационарном нагреве, которые отражают деформирование с учетом уровня нагружения. Кривые деформирования образца без нагрузки (1) определяют деформации температурного расширения, включая усадку.

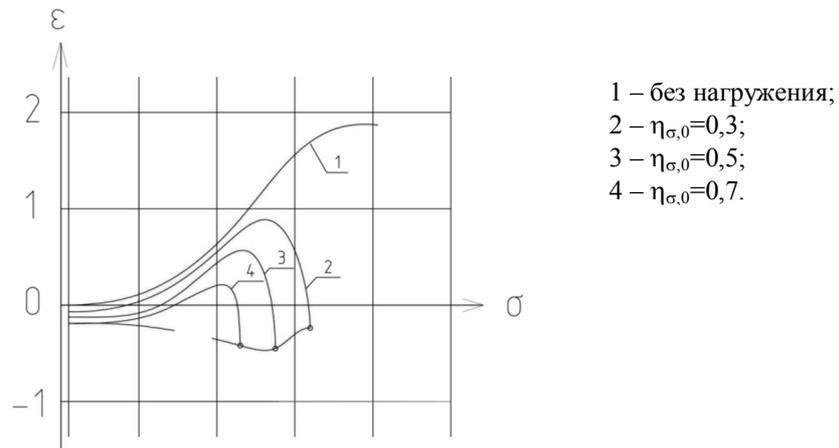


Рисунок 1 – Кривые деформирования бетонных образцов

Для статистической обработки результатов испытаний принимались опытные данные деформирования при температуре 20, 200, 400 и 600°C. В таблице 2 приведены результаты статистической обработки результатов испытаний при температуре 600°C.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки

Температурные деформации, %							
Температура	Количество образцов	Среднее арифметич.	Среднеквадратичное отклонение	Доверительный интервал	Коэффициент вариации	Относительная погрешность	Коэффициент однородности
600	6	0,96	0,03	0,03	2,82	3,24	0,92

Сравнение кривых развития деформирования цилиндров для бетонов классов В40 и В80 показывает, что класс бетона не влияет на форму деформирования.

При малых уровнях нагружения (0,3-0,5 от разрушающей нагрузки) на начальной стадии нагрева происходит удлинение образца, т.е. деформации температурного расширения превышают деформации сжатия, обусловленные силовым воздействием с учетом температурного нагрева материала. Чем выше уровень нагружения, тем существеннее проявляются деформации сжатия, развитие которых по мере роста температуры нагрева переходит в лавинообразное состояние.

Полученные кривые деформирования опытных предварительно нагруженных образцов цилиндров из бетона (см. рис. 1) представляют собой суммарные деформации (1) при нестационарном нагреве:

$$\varepsilon_{b,t}^{(tot)} = \varepsilon_{b,t}^{(tem)} + \varepsilon_{b,t}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{b,t}^{(tot)}$  – полные деформации;  $\varepsilon_{b,t}^{(tem)}$  – температурные деформации, вызванные изменением температуры бетона;  $\varepsilon_{b,t}$  – силовые деформации, обусловленные приложенной нагрузкой.

Отсюда, силовые деформации (2) определяются как разность полных и силовых деформаций. Температурные деформации определяются по результатам испытаний образца при нагреве без нагрузки:

$$\varepsilon_{b,t} = \varepsilon_{b,t}^{(tot)} - \varepsilon_{b,t}^{(tem)} \quad (2)$$

Согласно [3] выполняется построение изотермических диаграмм деформирования бетона при нагреве. Построение диаграмм выполнено при использовании следующих предпосылок:

- инвариантность предельного структурного напряжения от температуры и последовательности приложения силового и температурного воздействия;
- инвариантность изменения механических свойств от режима кратковременного нагрева. Некоторой неравновесностью в относительно непродолжительной стадии работы, предшествующей разрушению, благодаря которой существуют различия в поведении компонентов железобетона в условиях стандартного и реального пожаров, в данной методике пренебрегается;
- эквивалентность температурных зависимостей относительного коэффициента упругости и коэффициента снижения прочности;
- гипотеза об энтропийном затухании равновесных процессов.

На первом этапе выполняется построение кривой снижения прочности бетона с ростом температуры (рис. 2, а). Для каждого уровня начального нагружения  $\eta_{\sigma,0}$  в системе координат  $\gamma_{b,t} - t_b$  откладывается соответствующее значение температуры разрушения  $t_{b,u}$ , затем полученные точки соединяются плавной кривой 1, соответствующей изменению относительной прочности бетона  $\gamma_{b,t}$ . Второй этап построения диаграммы заключается в построении кривых развития силовых деформаций при различных уровнях нагружения  $\eta_{\sigma,0}$ , принятых в опытах (рис. 2, з, кривая 2). Силовые деформации бетона  $\varepsilon_{b,t}$  определяются путем вычитания из полных деформаций  $\varepsilon_{b,t}^{(tot)}$  их температурной составляющей  $\varepsilon_{b,t}^{(tem)}$ . На третьем этапе фиксируется кривая предельной сжимаемости бетона при нагреве (рис. 2, з, кривая 3). Четвертый этап состоит в формировании так называемой кривой максимально-граничного состояния в системе координат  $\sigma_{b,t} - \varepsilon_{b,t}$ , разграничивающей напряженно-деформированное состояние бетона в допредельной и запредельной областях его работы (рис. 2, б, кривая 4). На пятом этапе путем переноса точек с кривых развития силовых деформаций в систему координат  $\sigma_{b,t} - \varepsilon_{b,t}$  строятся диаграммы деформирования при любых интересующих нас температурах нагрева (рис. 2, б, кривые 5).

Наиболее простым и удобным для практического применения является аналитический способ задания связи напряжений и деформаций бетона при нагреве, предполагающий выражение диаграмм деформирования в виде функции исходных прочностных и деформативных характеристик, а также температурных параметров. В этом случае с ростом температуры нагрева происходит трансформация исходной диаграммы деформирования путем изменения положения ее вершины и угла наклона касательной в начале координат, увеличения кривизны ветвей при сохранении неизменным общего характерного очертания диаграммы.

Аналитическая аппроксимация температурных зависимостей прочностных и деформативных характеристик бетона выполняется с использованием общих методов математической статистики [4] с учетом [5].

В результате аналитической аппроксимации определены (табл. 3) коэффициент снижения прочности  $\gamma_{bt}$ , коэффициент снижения начального модуля деформаций  $\beta_{bt}$  и температурные деформации  $\varepsilon_{b,t}^{(tem)}$ .

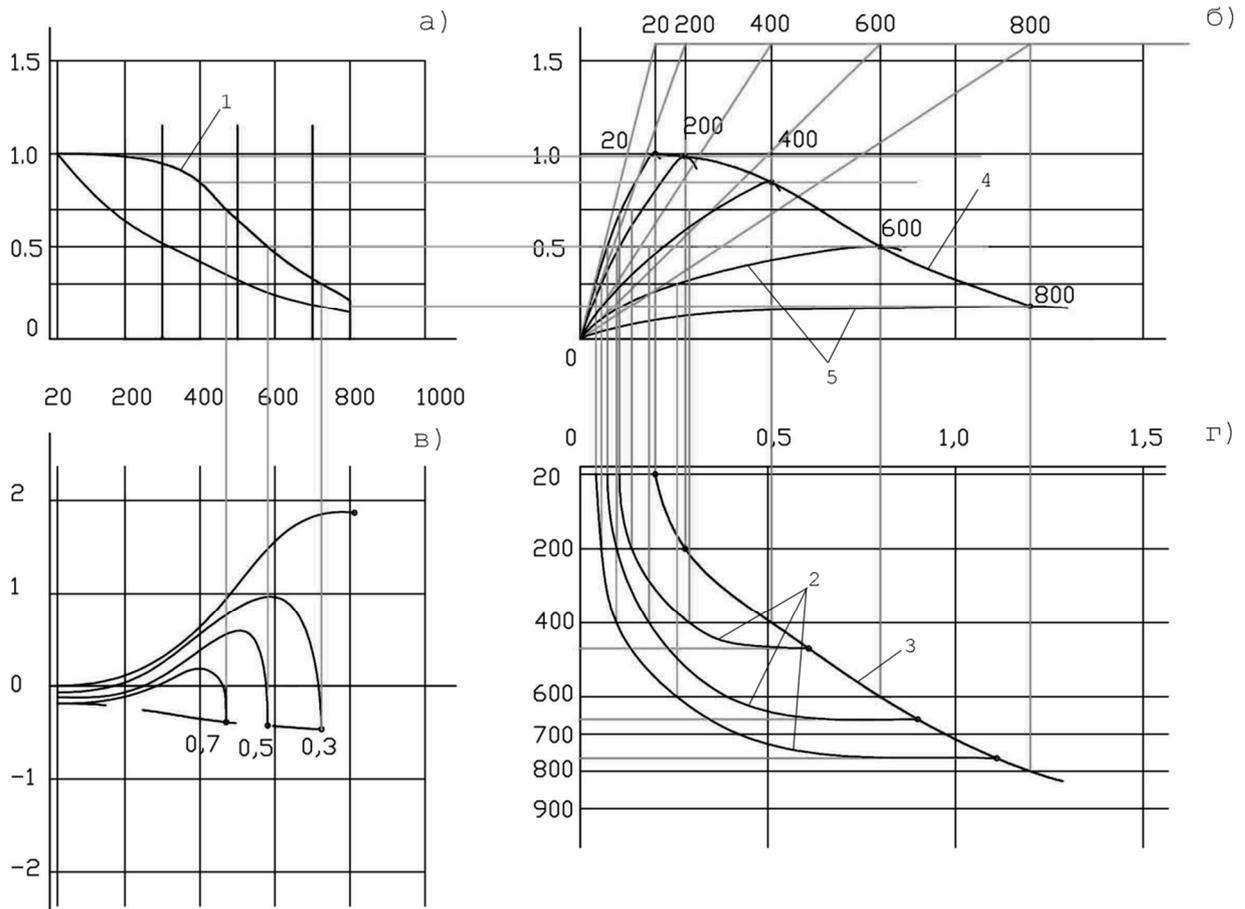


Рисунок 2 – Построение изотермических диаграмм деформирования бетона при нагреве

Таблица 3 – Определение опытных параметров в аналитических зависимостях основных термомеханических параметров бетона

Опытные параметры и статистические характеристики аппроксимации	Нормируемые термомеханические параметры бетона		
	коэффициент $\gamma_{b,t}$	коэффициент $\beta_{b,t}$	температурные деформации $\epsilon_{b,t}^{(tem)}$
<b>Бетон тяжелый на гранитном заполнителе марки В40</b>			
Опытные параметры в аналитических зависимостях	$m = 2,5$	$n = 1,2$	$p = 2,5$
	$\gamma = 2,95$	$\beta = 2,53$	$\alpha = 5,7$
Коэффициент корреляции	-	-	$\epsilon_{\alpha} = 1,65 \%$
Коэффициент вариации, %	0,9983	0,9977	0,9926
Доверительный интервал при обеспеченности 0,95	8,1	7,6	11,0
	$\gamma = 2,885...3,024$	$\beta = 2,370...2,692$	$\alpha = 5,539...5,925$
<b>Бетон тяжелый на гранитном заполнителе марки В80</b>			
Опытные параметры в аналитических зависимостях	$m = 2,7$	$n = 1,1$	$p = 3$
	$\gamma = 4,20$	$\beta = 2,5$	$\alpha = 3,6$
Коэффициент корреляции	-	-	$\epsilon_{\alpha} = 2,2 \%$
Коэффициент вариации, %	0,9972	0,9997	0,9991
Доверительный интервал при обеспеченности 0,95	7,6	7,2	4,2
	$\gamma = 4,399...4,683$	$\beta = 2,442...2,558$	$\alpha = 3,493...3,636$

На основании аналитического расчета получены кривые снижения прочности (рис. 3), начального модуля упругости (рис. 4) и температурных деформаций (рис. 5) с учетом температуры их нагрева.

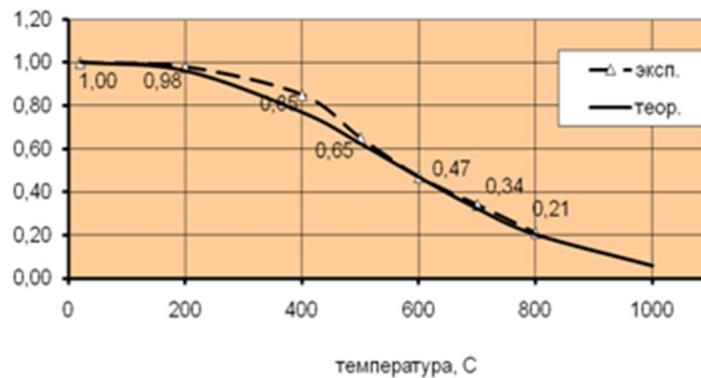


Рисунок 3 – Снижение прочности бетона В40 при нагреве

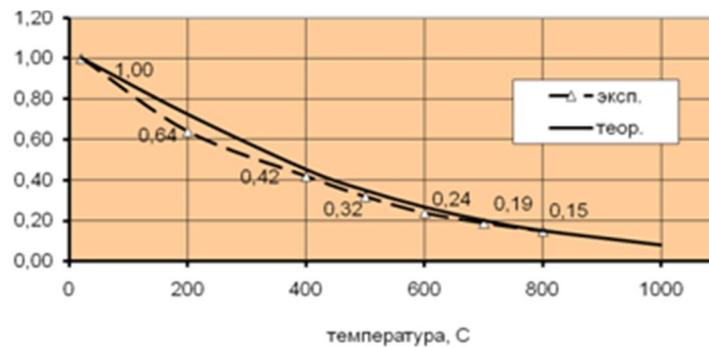


Рисунок 4 – Снижение начального модуля деформации бетона В40 при нагреве

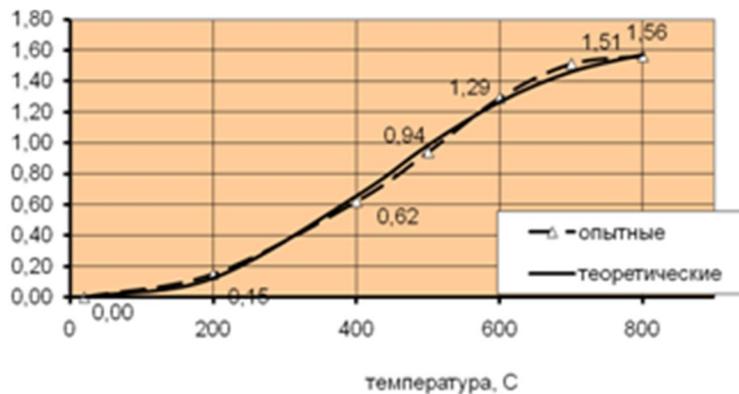


Рисунок 5 – Температурные деформации бетона В40 при нагреве

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы испытаний» [Текст].
- Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций [Текст]. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
- Федоров, В.С. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций [Текст] / В.С. Федоров, В.Е. Левитский, И.С. Молчадский и др. – М.: АСВ, 2009. – 408 с.
- Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений [Текст] / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
- Байков, В.Н. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей [Текст] / В.Н. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1977. – №6. – С. 15-18.
- Федоров, В.С. Основные положения теории расчета огнестойкости железобетонных конструкций [Текст] // Жилищное строительство. – 2010. – №4. – С. 2-5.

**Федоров Виктор Сергеевич**

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»

**Граминовский Николай Александрович**

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва

Аспирант

E-mail: Nick-Gram@yandex.ru

---

V.S. FEDOROV, N.A. GRAMINOVSKIY

## RESEARCH OF STRENGTH AND DEFORMATIVE CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH CONCRETE WHEN HEATING FOR THE SOLUTION OF THE STATIC PROBLEM OF FIRE RESISTANCE

*In the article are given results of tests and processing of results of pilot studies of high-strength concrete on high-temperature influence. On the basis of processing of experimental data curve deformations of concrete at non-stationary heating taking into account power influence are constructed and deformations of temperature expansion of concrete, including a shrinkage, are defined. Isothermal diagrams of deformation of concrete when heating are constructed. Analytical dependences of change of strength and deformation characteristics of concrete when heating are defined.*

**Keywords:** *high-strength concrete, fire resistance, isothermal strain diagram.*

### BIBLIOGRAPHY

1. GOST 24452-80 Betony. Metody ispytaniy [Tekst].
2. Milovanov, A.F. Ognestojkost' zhelezobetonnyh konstrukcij [Tekst]. – M.: Strojizdat, 1986. – 224 s.
3. Fedorov, V.S. Ognestojkost' i pozharnaja opasnost' stroitel'nyh konstrukcij [Tekst] / V.S. Fedorov, V.E. Levitskij, I.S. Molchadskij i dr. – M.: ASV, 2009. – 408 s.
4. Smirnov, N.V. Kurs teorii verojatnostej i matematicheskoj statistiki dlja tehniceskikh prilozhenij [Tekst] / N.V. Smirnov, I.V. Dunin-Barkovskij. – M.: Nauka, 1969. – 511 s.
5. Bajkov, V.N. Postroenie zavisimosti mezhdju naprjazhenijami i deformacijami szhatogo betona po sisteme normiruemyh pokazatelej [Tekst] / V.N. Bajkov, S.V. Gorbatov, Z.A. Dimitrov // Izvestija VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1977. – №6. – S. 15-18.
6. Fedorov, V.S. Osnovnye polozhenija teorii rascheta ognestojkosti zhelezobetonnyh konstrukcij [Tekst] // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2010. – №4. – S. 2-5.

**Fedorov Viktor Sergeevich**

Moscow state university of railway engineering, Moscow

Doctor of technical science, professor, head of department «Construction designs, buildings and constructions»

**Graminovskiy Nikolay Aleksandrovich**

Moscow state university of railway engineering, Moscow

Post-graduate student

E-mail: Nick-Gram@yandex.ru

УДК 619

КОЛЕСНИКОВА Т.Н., НОВИЦКАЯ Е.С.

### **ПРОБЛЕМЫ ЭКОПОЗИТИВНОГО ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ДЕТСКИХ ДОШКОЛЬНЫХ УЧЕРЕЖДЕНИЙ ПРИГОРОДНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАСТРОЙКИ**

*Рассмотрена проблема отсутствия детских садов в коттеджных поселках. Произведен анализ размещения детских садов в структуре поселка с точки зрения экопозитивности и требований «зеленого стандарта» строительства. Рассмотрена тенденция зависимости мощности детских садов от площади участков под застройку. Предложены методы решения по повышению комфортной доступности детских дошкольных учреждений для пригородных поселений индивидуальной застройки.*

**Ключевые слова:** детский сад, пригородное поселение, радиус доступности, экопозитивный подход.

С началом реализации правительством РФ Национального проекта «Доступное и комфортное жилье – гражданам России» встал вопрос о его приоритетах. Одним из таковых стало малоэтажное строительство, а в его рамках – индивидуальное малоэтажное строительство.

В данный момент в нашей стране широко развивается сеть коттеджных поселков. Наличие в поселке центральных коммуникаций (газ, электричество, водопровод, канализация) воспринимается как должное, но наличие в жилом комплексе объектов социально-бытовой инфраструктуры – явление редкое. Подавляющее большинство жителей – это люди работоспособного возраста, имеющие детей дошкольного и младшего школьного возраста. При этом за неимением собственного детского сада или школы они вынуждены пользоваться услугами образовательных учреждений, находящихся за несколько километров от дома, что причиняет значительное неудобство, а помимо этого, не соответствует нормативам, «зеленым стандартам» строительства, которые предусматривают экопозитивное отношение к среде обитания человека, комфортное местоположение объектов социальной инфраструктуры, наличие развитой транспортной и социально-бытовой инфраструктуры, эстетической и экологической привлекательности окружающей территории.

Следовательно, детский сад – важный объект социальной инфраструктуры коттеджного поселка. В отдельных коттеджных поселках генпланом предусмотрены детские сады, но их строительство отнесено ко второй или последующим очередям строительства. В некоторых случаях место, предусмотренное под детский сад, позднее застраивается коттеджами.

Поэтому при проектировании генеральных планов поселков необходимо правильно выбрать тип здания и рассчитать его мощность, поскольку ДДУ являются составной частью всех градостроительных структурных образований: от группы жилых домов с учреждениями приближенного обслуживания до жилой зоны в целом с соответствующими ей учреждениями культурно-бытового обслуживания.

Расчет сети детских дошкольных учреждений в коттеджном поселке производится согласно СП «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений». Этими нормами предусматривается, что число мест в детских яслях-садах следует устанавливать в зависимости от демографической структуры населения данного населенного пункта исходя из охвата детей дошкольного возраста: на первую очередь строительства – 60%, на расчетный срок – 75%.

При отсутствии таких данных число мест в детских дошкольных учреждениях допускается принимать до 100 на 1000 жителей. Эта расчетная норма является приблизительной, среднестатистической, требующей корректировки в каждом отдельном случае в соответствии с фактической демографией и имеющимися потребностями.

На градостроительное размещение в структуре поселка влияет ряд факторов: радиус доступности, количество жителей, которое этот радиус охватывает. Таким образом, вместимость детского сада будет также зависеть от этих факторов.

Анализ генеральных планов коттеджных поселков показал, что в определении мощности предприятий социального обслуживания населения специфическим фактором являются размеры участков индивидуальных домовладений (площадей приквартирных участков индивидуальной и блокированной застройки), в зависимости от которых определяется плотность населения и число жителей. При анализе генеральных планов строящихся коттеджных поселков г. Орла Орловского района (Ново-Образцово, Куликово поле, Соловьиная роща, коттеджный поселок вблизи н.п. Платоново, коттеджный поселок вблизи н.п. Малая Куликовка) прослеживается тенденция увеличения площади участков по степени отдаленности от города (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительные показатели коттеджных поселков г. Орла Орловского района

Название поселка, удаленность	Основные показатели (площадь участка, инфраструктура)
Ново-Образцово (2 км от г. Орла)	I очередь строительства: квартиры в таунхаусах площадью 71 кв.м. с участками от 2 до 3 соток коттеджи общей площадью 88 кв.м. с участками по 8 соток коттеджи общей площадью 96 кв.м. с участками по 10 соток коттеджи общей площадью 123 кв.м. с участками по 15 соток квартиры в дубль-хаусе площадью 78 кв.м. с участками по 6 соток квартиры в дубль-хаусе площадью 61 кв.м. с участками по 4 сотки II очередь строительства: торгово-развлекательный центр, школа, детский сад, поликлиника, гостиница и паркинг
Куликово поле (5 км от г. Орла)	I очередь строительства: 374 коттеджа с участками от 12 до 20 соток II очередь строительства: торговый центр, супермаркет и два детских садика. В дальнейшем, планируется строительство кинотеатра, фитнес-центра и интернет-кафе
Соловьиная Роща (в черте г. Орла)	двухуровневые квартиры в таунхаусах с участками от 2 до 3 соток, рядом находится гипермаркет «Линия»
н.п. Платоново (2 км от г. Орла)	торговый центр, детский ясли-сад на 95 мест, школа на 162 учащихся, культурно-спортивный центр, зона отдыха
н.п. Малая Куликовка (6 км от границы города по федеральной трассе Орел-Тамбов)	369 жилых домов на участках площадью 15 соток культурно-оздоровительный центр, торговый центр, детский ясли-сад на 95 мест

Также существует связь площади участка, выделяемого на домовладение, с величиной города, около которого расположен коттеджный поселок. Так, для пригородной зоны Москвы характерны минимальные площади под застройку, предусмотренные нормами, по мере удаления от черты города площадь участка растет в связи с падением стоимости земли (200-400 м<sup>2</sup>, включая площадь застройки, – при одно-, двух- или четырехквартирных одно-, двухэтажных домах; 400-600 м<sup>2</sup> и более, включая площадь застройки, – при одно-, двухквартирных одно-, двухэтажных домах в застройке усадебного типа).

Применительно к поселениям Орловского района и г. Орла эта цифра меняется от 0,02 га (частично в городской черте, частично за ней) до 0,15 га (6 км от города).

При нормируемом радиусе доступности ДДУ 500 м средняя численность населения может определяться по формуле 1:

$$N_n = 0,75 \frac{S_R \cdot k_c}{S_{yч}}, \quad (1)$$

где  $N_n$  – средняя численность населения;  $S_R$  – площадь охватываемой территории при данном радиусе доступности (50 га);  $k_c$  – коэффициент семейности (3,2);  $S_{уч}$  – площадь участка застройки; 0,75 – нормативное соотношение участков жилой застройки в составе жилых образований коттеджной застройки.

Зная численность населения, можно определить среднее требуемое число мест в детских садах на территории, застроенной участками определенных размеров. Подсчет числа мест в ДДУ при радиусе доступности 500 м приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Подсчет числа мест в ДДУ при радиусе доступности 500 м

Площадь участка	Количество участков	Число жителей	Требуемое число мест в детском саду	Типовые детские сады	
				вместимость	Число групп
0,02	1875	6000	600	350; 250	22, 17
0,03	1250	4000	400	210; 190	16, 15
0,04	937,5	3000	300	290	15
0,06	625	2000	200	190	10
0,08	468,75	1500	150	155	8
0,1	375	1200	120	125	7
0,12	312,5	1000	100	95	5
0,15	250	800	80	75	5

Поскольку жители коттеджных поселков, в большинстве своем, бывшие городские жители, то возможно предложить для повышения комфортности проживания в поселке принять радиусы доступности учреждений социальной сферы как для городских поселений. Подсчет числа мест в ДДУ при радиусе доступности 300 м приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Подсчет числа мест в ДДУ при радиусе доступности 300 м

Площадь участка	Количество участков	Число жителей	Требуемое число мест в детском саду	Типовые детские сады	
				вместимость	Число групп
0,02	675	2160	216	210	12
0,03	450	1440	144	135	7
0,04	337,5	1080	108	95	5
0,06	225	720	72	75	5
0,08	168,75	540	54	55	3
0,1	135	432	43,2	45	2
0,12	112,5	360	36	40	2
0,15	90	288	28,8	30	2

Таким образом, определяющим фактором в формировании сети (выборе типов ДДУ) также является плотность застройки поселков, а, следовательно, и численность населения в пределах радиуса доступности. В зависимости от мощности поселка можно ограничиться одним детским садом, но иногда возникает необходимость строительства нескольких таких объектов. Анализ существующих проектов показал, что выбор типа и мощности здания сказывается при размере участков от 0,4 га. В коттеджных поселках с площадью участка меньше 0,4 га возникает необходимость строительства детского сада на каждую очередь строительства, а при размере участков от 0,4 га появляется необходимость рационально формировать сеть учреждений.

Коттеджные поселки застраиваются постепенно, также постепенно должна увеличиваться мощность ДДУ. При нормируемом радиусе доступности 500 м строительство ДДУ должно осуществляться одновременно, что зачастую относит его ко второй очереди строительства.

С позиций экопозитивного подхода более комфортным является ступенчатое развитие, при котором создается центральный блок с радиусом доступности 300 м и сеть удаленных от него на 300 м домашних и семейных детских садов, которые помогают последовательно наращивать мощность дошкольного учреждения параллельно с коттеджной застройкой, а, следовательно, с

увеличением численности населения. Уменьшение радиуса доступности до 300 м повышает комфортность; создание единого пищеблока в центральном корпусе, обслуживающего всю сеть, снижает затраты на стадии строительства и эксплуатации объектов. Схема размещения сети ДДУ коттеджного поселка при радиусе доступности 300 м представлена на рисунке 1.

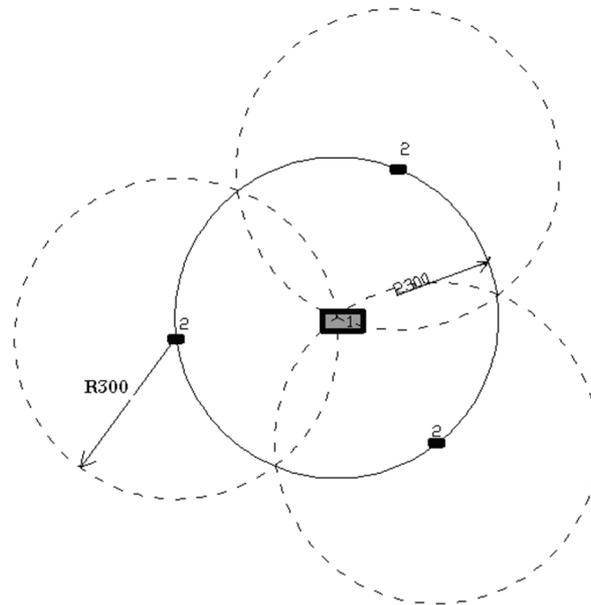


Рисунок 1 – Схема размещения сети ДДУ коттеджного поселка:  
1 – центральный блок; 2 – домашние детские сады

Анализ существующих генеральных планов новых строящихся поселков Орловского р-на и г. Орла показывает, что объекты инфраструктуры расположены рассредоточенно, участки под застройку занимают значительную площадь, в некоторых поселках вовсе не предусмотрены социальные объекты (Соловьяная Роща, рис. 2), в отдельных случаях строительство сферы обслуживания отнесено ко второй очереди строительства (Ново-Образцово, Куликово поле). Наиболее соответствующими условиям комфортности населения в отношении наличия инфраструктуры объектами является коттеджный поселок вблизи н.п. Платоново (рис. 3) и коттеджный поселок вблизи н.п. Малая Куликовка.



Рисунок 2 – Схема генерального плана коттеджного поселка «Соловьяная роща»



Рисунок 3 – Схема генерального плана коттеджного поселка «Платоново»

Автором предлагается решение, при котором ДОО сгруппированы в едином комплексе – Центре комплексного развития и творчества.

В случае постройки Центра комплексного развития и творчества была бы значительно сэкономлена территория, которую можно было бы использовать для застройки коттеджами. Также сократились затраты подготовительного этапа строительства и объемы строительных работ. Здания социальной инфраструктуры, объединенные в единый комплекс, наиболее экономически выгодны и архитектурно выразительны.

Организация единого центра позволит реализовывать следующие принципы:

- 1) принцип комфортной доступности;
- 2) сетевой принцип формирования ДДУ в планировке и застройке поселений;
- 3) принцип кооперации объектов социального обслуживания коттеджного поселка;
- 4) принцип экопозитивности генерального плана коттеджного поселка.

Таким образом, целесообразно создать сеть детских садов, представляющую собой комплекс, включающий в свой состав помимо детского сада, досуговые помещения, во взаимосвязи с ним находятся домашние детские сады. Благодаря такому решению исчезают проблемы радиуса доступности ДДУ (возможно и его сокращение), появляется объект для культурного и спортивного отдыха населения коттеджного поселка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 42.13330.2011 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений [Текст].
2. Коттеджные поселки г. Орла [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.realtyse.net>.

#### **Колесникова Татьяна Николаевна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Доктор архитектуры, профессор, заведующая кафедрой «Архитектура»  
E-mail: [Kolesnikovoj@yandex.ru](mailto:Kolesnikovoj@yandex.ru)

#### **Новицкая Елена Сергеевна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Аспирант кафедры «Архитектура»  
E-mail: [novickajaes@mail.ru](mailto:novickajaes@mail.ru)

T.N. KOLESNIKOVA, E.S. NOVICKAJ

**THE PROBLEMS OF PLACEMENT AND GENERAL PLAN  
DEVELOPMENT FOR PRESCHOOL INSTITUTIONS  
IN SUBURBAN SETTLEMENT AREA**

*The problem of absence of kindergartens in cottage settlements is considered. The analysis of placing of kindergartens in settlement structure is made. A tendency of dependence of capacity of kindergartens from the area of sites under building. Decision methods on increase of comfortable availability of preschool institutions for suburban settlements of individual building are offered.*

**Keywords:** kindergarten, suburban settlement, availability radius, ecopositive approach.

**BIBLIOGRAPHY**

1. SP 42.13330.2011 Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih poselenij [Tekst].
2. Kottedzhnye poselki g. Orla [Jelektronnyj resurs] // Rezhim dostupa: <http://www.realtyse.net>.

**Kolesnikova Tat'jana Nikolaevna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of architecture, professor, head of departament «Architecture»  
E-mail: kolesnikovoj@yandex.ru

**Novickaj Elena Sergeevna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Post-graduate student of departament «Architecture»  
E-mail: novickajaes@mail.ru

УДК 625.7/.8:658.562

БАТРАКОВА А.Г.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРА**

*Рассмотрена методика определения толщины конструктивных слоев дорожных одежд с применением георадарных технологий. Основу методики составляет алгоритм обработки импульсных сигналов. Приведены результаты полевых экспериментов по апробации работы алгоритмов и методики на автомобильных дорогах общего пользования.*

**Ключевые слова:** георадар, толщина конструктивных слоев, диэлектрическая проницаемость.

Решение задач оценки работоспособности и прогнозирования состояния дорожных одежд подразумевает, прежде всего, получение наиболее полной и достоверной информации о текущих характеристиках конструкции дорожной одежды. К решению этих задач существует два основных подхода. Первый подход предусматривает привлечение для количественного описания текущего состояния дорожной одежды обобщенных показателей и ориентирован, в первую очередь, на оценку потребительских свойств дороги. Вторым подходом к оценке текущего состояния дорожной одежды ориентирован на анализ интегральной характеристики, отражающей совокупность свойств всей конструкции как функции отклика конструкции на внешнее воздействие. Оценка состояния производится путем измерения модуля упругости (упругого прогиба) на поверхности покрытия и последующей проверки соответствия полученного (фактического) значения проектным данным. Следует отметить также, что вычисленное по результатам испытаний числовое значение модуля упругости конструкции часто не дает ответа на вопрос о причинах, определяющих состояние конструкции в данный момент времени.

Помимо этого рассмотренным методам оценки присущи и некоторые другие недостатки, а именно:

- невозможность непрерывного (при движении передвижной лаборатории со скоростью потока) получения информации о состоянии дорожной одежды;
- большие затраты времени на проведение единичного измерения;
- нестабильность получаемых результатов в силу их значительного изменения даже между близкими участками, что требует дополнительного усреднения, затрудняющего интерпретацию получаемых данных, а также диктует необходимость получения дополнительной информации, например, о влажности подстилающего грунта.

Толщина конструктивных слоев дорожных одежд оказывает существенное влияние на несущую способность, работоспособность и надежность дорожных одежд. Традиционно толщина конструктивных слоев при диагностике автомобильных дорог определяется по результатам отбора кернов из конструкции. Такой метод является неэффективным в силу высокой стоимости и низкой производительности. Как и большинство методов точечной оценки характеристик слоев конструкции дорожной одежды данный метод не позволяет судить об изменении толщины конструктивных слоев на протяженном участке дороги. Подтверждением тому являются результаты георадарного обследования, выполненные на автомобильных дорогах общего пользования Харьковской области в период с 2009 года по 2012 год. Они свидетельствуют, что толщина конструктивных слоев дорожной одежды на отдельных участках автомобильных дорог может существенно изменяться в силу технологических причин, изменения режима увлажнения земляного полотна, частичного разрушения и последующего доуплотнения материалов слоев под действием транспортных нагрузок (рис. 1).

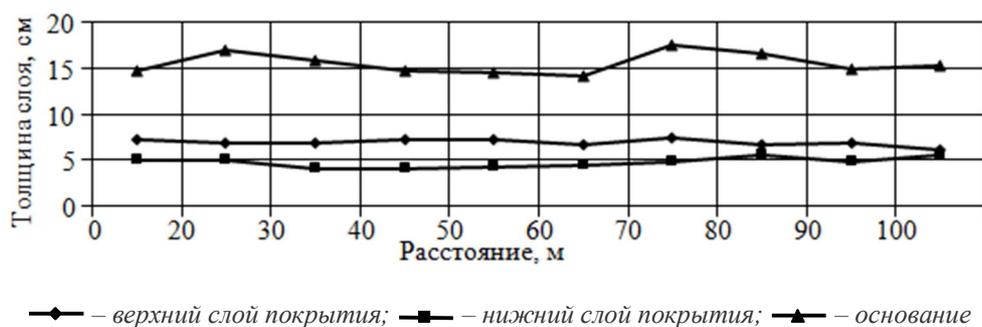


Рисунок 1 – Изменение толщины конструктивных слоев дорожных одежд по результатам георадарного обследования (осень 2011 г.)

На участках уменьшения толщины конструктивных слоев относительно проектных значений будет снижаться несущая способность дорожной одежды, что в конечном итоге приведет к преждевременному разрушению конструкции. Прогнозные оценки срока службы таких конструкций, как отмечают авторы [1], значительно различаются. Это сильно затрудняет использование результатов обследований автомобильных дорог и препятствует разработке рекомендаций по проектированию и проведению ремонтных мероприятий.

Эффективным потенциалом для решения задач диагностики дорожных одежд обладают методы подповерхностного зондирования и соответствующие средства – георадары. Они позволяют дать количественную оценку «скрытых» параметров, таких, например, как толщина конструктивных слоев и наличие подповерхностных дефектов – трещин, зон разуплотнения и переувлажнения.

В настоящее время в большинстве случаев анализ радарограмм производится оператором на основании его опыта. Однако такая обработка обладает рядом недостатков: во-первых, необходимость привлечения оператора существенно снижает скорость обработки, во-вторых, к настоящему моменту практически отсутствуют алгоритмы и методики оперативного получения электрофизических характеристик дорожных одежд по данным зондирования. Лишь в нескольких работах [2-4] предпринимались попытки автоматизированного вычисления толщины слоев дорожной одежды, поэтому для продуктивного применения георадарных технологий необходимо разработать методы и алгоритмы пересчета результатов георадарного зондирования дорожных одежд (значений задержки сигналов и их амплитудных характеристик) в электрофизические параметры ( $\epsilon$ ) и на этой основе – в геометрические ( $h_i$ ) параметры.

Поскольку в большинстве современных георадаров пространственные размеры антенн и зондирующих импульсов малы по сравнению с радиусами кривизны поверхности дороги, а характерный масштаб неровностей (шероховатости) поверхности существенно меньше кривизны волнового фронта, наиболее эффективным является использование в качестве модели дорожной одежды плоскостной среды. При исследовании дорожных конструкций на основе модели плоскостной среды каждый слой характеризуется тремя параметрами – диэлектрической проницаемостью и проводимостью материала, а также его толщиной (для нижнего подстилающего слоя она считается бесконечной).

Стандартная обработка сигналов георадара подразумевает определение времени задержки сигналов, отраженных от внутренних неоднородностей исследуемой конструкции (границы слоев, трубы, арматура), с последующим пересчетом в толщину слоя. Главной проблемой интерпретации при таком подходе является зависимость задержки сигнала как от толщины слоев, так и от их диэлектрической проницаемости. Для определения диэлектрической проницаемости материалов слоев проводят выборочный отбор кернов с целью калибровки георадарных данных. Затем, считая диэлектрическую проницаемость известной и неизменной, определяют скорость распространения сигнала в разных слоях:

$$v_i = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_i}}, \tag{1}$$

где  $v_i$  – скорость сигнала в  $i$ -ом слое;  $c$  – скорость света в вакууме, см/нс;  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя.

Далее, зная задержку, определяют толщину слоев по формуле [6]:

$$h_i = \frac{v_i \cdot \Delta t_i}{2}, \tag{2}$$

где  $\Delta t_i$  – задержка сигнала, обусловленная  $i$ -ым слоем, равная удвоенному времени прохождения сигнала между границами слоя, нс;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя, см.

Практическое применение данного метода показывает неоднозначность определения толщины слоев дорожной одежды, поскольку изменение времени задержки сигнала может быть связано как с изменением толщины слоя, так и с увеличением пористости или влагосодержания материала. Таким образом, для получения достоверных данных необходимо использовать более совершенные методики. Поэтому на основании теоретического анализа и обработки данных экспериментов предлагается использовать следующий вариант решения данной проблемы, заключающийся в разбиении исходной задачи на две составляющие: определение диэлектрической проницаемости слоя и последующее определение его толщины.

Для определения диэлектрической проницаемости и толщины слоев конструкции используется решение вспомогательной задачи об отражении монохроматической волны от плоскостройной среды. Задача состоит в вычислении значений коэффициентов отражения и прохождения волн через границы слоев. Для расчета коэффициентов отражения и прохождения через плоскую границу раздела диэлектриков при условии, что параметры сред известны, существуют основополагающие формулы [5, 6].

$$R_{n-1,n} = \frac{A_{n,n-1}}{A_{n-1,n}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} - \sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}}; \tag{3}$$

$$T_{n\pm 1,n} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}}, \\ \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}} \end{cases}, \tag{4}$$

где  $n-1, n, n+1$  – номера слоев;  $A_{n-1,n}, A_{n,n-1}$  – амплитуды падающего на границу между средой с  $\varepsilon_{n-1}$  и средой с  $\varepsilon_n$  и отраженного в  $n-1$ -ю среду сигналов,  $A_{n-1,n} = A_0$ ;  $T_{n-1,n}$  – коэффициент прохождения из  $(n-1)$ -го слоя в  $n$ -й (верхняя строка);  $T_{n+1,n}$  – коэффициент прохождения из  $(n+1)$ -го слоя в  $n$ -й;  $R_{n,n-1}$  – коэффициент отражения от границы  $(n-1)$ -го и  $n$ -го слоев в  $(n-1)$ -й слой;  $B_{j,j+1}$  – промежуточные параметры, используемые для сокращения записи (рис. 2).

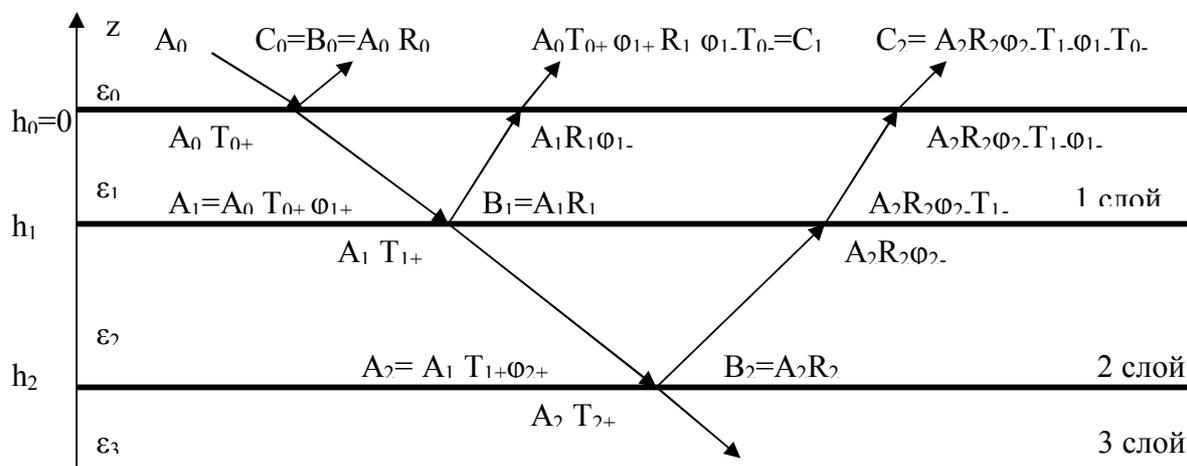


Рисунок 2 – Схема исследуемой структуры

Основная цель на данном этапе состоит в определении величины коэффициента отражения от нижней границы, например, 1-го слоя по известной (измеренной экспериментально) амплитуде сигнала на выходе структуры (в верхнем полупространстве – в воздухе).

Введем понятие передаточной функции слоя ( $P_n$ ) как множителя при коэффициенте отражения  $R_n$  в равенстве, связывающем амплитуду волны, отраженной от нижней границы данного слоя с амплитудой волны, прошедшей обратно в верхний слой (для первого слоя верхним слоем будет свободное пространство – воздух). При прохождении волны через границу (между слоями с индексами 0 и 1) в прямом и обратном направлениях функция передачи  $P_1$  сигнала будет определяться произведением соответствующих коэффициентов прохождения (3):

$$P_1 = T_{0,1} \cdot T_{1,0} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1}} \cdot \frac{2\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1}} = 4 \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_0}}{(\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1})^2}. \quad (4)$$

Обозначим амплитуды сигналов, которые бы регистрировала антенна георадара при отсутствии наружных слоев, через  $B_{n,n+1}$ . В случае первого слоя, очевидно, имеем  $A_0 \cdot P_1 \cdot R_1 = B_1$ , т.е.:

$$P_1 = (B_1 / R_{1,2}) \cdot A_0^{-1} = T_{1,2} \cdot T_{2,1}. \quad (5)$$

Преимуществом такого подхода является возможность перемножения передаточных функций каждого слоя для получения передаточной функции системы из  $n$  слоев. Например, в случае слоя с номером  $n$  имеем простую формулу:

$$R_{n,n+1} = A_0^{-1} \cdot B_{n,n+1} / (P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n) = A_0^{-1} \cdot B_{n,n+1} / \prod_{j=1}^n P_j, \quad (6)$$

где  $P_j = T_{j-1,j} \cdot T_{j,j-1}$ .

Далее, используя определение коэффициента отражения  $R_{j,j+1} = \frac{A_{j+1,j}}{A_{j,j+1}}$  с помощью определенного из этой формулы значения  $R_{n,n+1}$  из соотношения (3), можем вычислить диэлектрическую проницаемость нижнего ( $n+1$ ) слоя по формуле:

$$\sqrt{\varepsilon_{j+1}} = \sqrt{\varepsilon_j} \frac{A_{j,j+1} - A_{j+1,j}}{A_{j,j+1} + A_{j+1,j}}. \quad (7)$$

Затем с помощью (4) вычисляется коэффициент прохождения через нижнюю границу данного  $n$ -го слоя. Далее операции (4-7) повторяются. Наконец, зная диэлектрическую проницаемость  $n+1$  слоя, мы можем рассчитать его толщину по формулам (1, 2).

Таким образом, общий порядок определения толщины слоев дорожной одежды при интерпретации результатов георадарного зондирования следующий:

а) регистрация сигнала прямого прохождения, поступающего в приемный тракт антенны при излучении антенны в свободное пространство;

б) получение калибровочного сигнала, отраженного от листа металла, лежащего на поверхности покрытия. Для учета кривизны волнового фронта, конечных размеров и проводимости листа металла предложено ввести поправочный коэффициент –  $K_c$ . Этой операцией корректируется амплитуда калибровочного сигнала и вместо фактического сигнала  $U = f(t)$  в обработку поступает модифицированный сигнал  $U = K_c \cdot f(t)$ ;

в) зондирование конструкции дорожной одежды;

г) определение диэлектрической проницаемости слоя осуществляется по общей формуле (7), где  $j = 0$  для верхнего слоя конструкции;

д) координаты границ слоев определяются по формуле:

$$Z_i = \sum_{i=1}^l \frac{(t_i - t_{i-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_i}} = \sum_{i=1}^l \frac{\Delta t_i \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_i}},$$

где  $Z_i$  – координата  $i$ -й границы (верхняя граница имеет индекс 0);  $t_i, t_{i-1}$  – время прохождения сигналом  $i$ -й и  $(i-1)$ -й границ соответственно, определенные с помощью преобразования Гильберта, нс;  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве, нс;  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ -го слоя;

е) толщина слоев  $h_i$  рассчитывается по формуле:

$$h_i = Z_i - Z_{i-1}; \quad Z_0 = 0, i = 1, 2, \dots, I.$$

Данная процедура позволяет одновременно определять значения толщины и диэлектрической проницаемости конструктивных слоев дорожной одежды без дополнительных лабораторных экспериментов, а также с минимальной стартовой калибровкой георадара при обследовании дорожной одежды.

Экспериментальная проверка предложенных методов и алгоритмов решения задач толщинометрии конструкций дорожных одежд осуществлялась как на лабораторных моделях, так и на автомобильных дорогах общего пользования. Измерения проводились на участках дорог с разным сроком эксплуатации: в процессе строительства, в первый год эксплуатации после капитального ремонта, менее 5 лет, от 5 до 10 лет, более 10 лет.

В процессе измерений использовались два различных блока дипольных антенн, а также блок антенн для работы с кросс-поляризационными компонентами (рис. 3).



Рисунок 3 – Оборудование для георадарного обследования дорожных одежд

Для визуализации и первичной обработки результатов экспериментальных исследований использовалась программа «GPR Proview». Для корректной интерпретации результатов зондирования многослойных объектов со слоями малой электрической толщины были разработаны вычислительные алгоритмы, основанные на вычислении временной задержки по Гильберту совместно со спектральной обработкой сигналов и реализованные в программе «Geovisys».

По результатам экспериментальных исследований обоснована схема обработки сигналов с предварительной калибровкой, которая требует более сложных алгоритмов обработки, но дает более точные результаты, а также определены значения параметров и коэффициентов, учитывающих кривизну волнового фронта при получении калибровочного сигнала ( $K_c = 1,05$ ).

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных алгоритмов определения толщины конструктивных слоев дорожных одежд. Полученные результаты соответствуют допустимой точности определения толщины конструктивных слоев дорожной одежды (рис. 4, табл. 1).

Результаты георадарного зондирования дорожных одежд с целью определения толщины конструктивных слоев могут быть использованы для определения модуля упругости конструкции дорожной одежды по известным расчетным схемам. По результатам георадарного зондирования на автомобильной дороге М-03 «Киев – Харьков – Довжанский» проведен рас-

чет общего модуля на поверхности конструкции –  $E_{\text{общ}} = 324$  МПа. Общий модуль на поверхности конструкции, полученный путем измерения упругого прогиба методом статического нагружения, составил 340 МПа. Расхождение в оценках различными методами составляет 4,9%, что свидетельствует о высокой достоверности метода расчетного определения общего модуля конструкции дорожной одежды с привлечением данных, полученных по результатам георадарного зондирования.

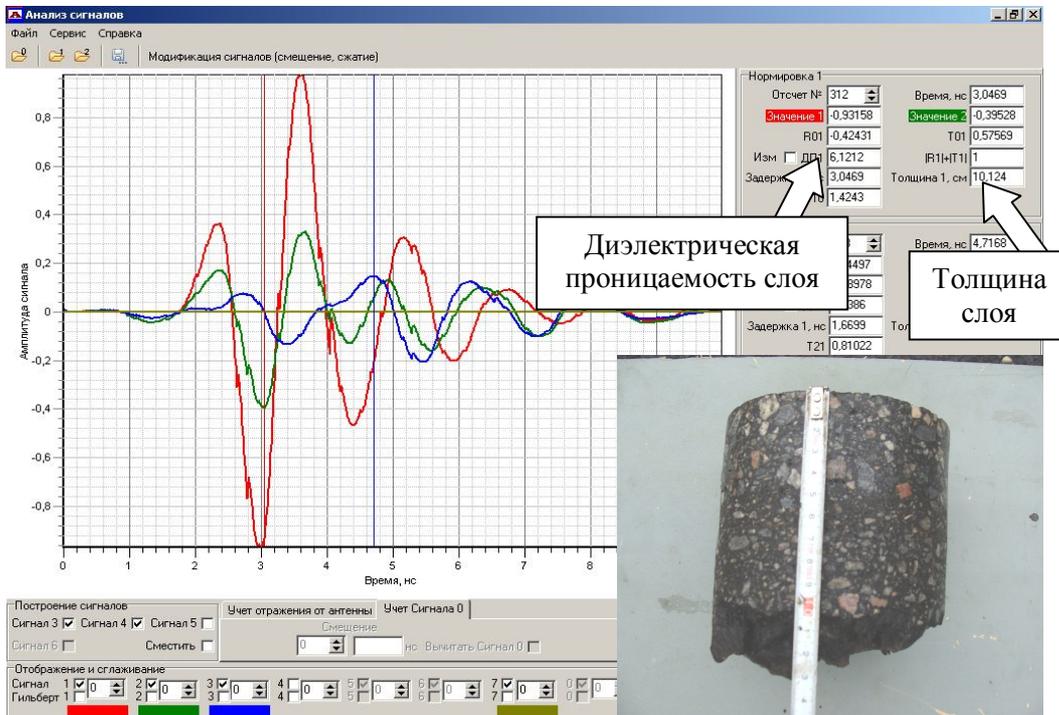


Рисунок 4 – Определение толщины пакета асфальтобетонных слоев

Таблица 1 – Результаты определения толщины слоев

Показатели	Фактическое значение по керну	Расчетное значение по результатам георадарного обследования
Толщина пакета асфальтобетонных слоев	10,5 см	10,124 см
Толщина верхнего слоя покрытия	4,75	5,0037 см
Толщина первого и второго слоев покрытия	верхний слой – 5,5 см, нижний слой – 5,0 см	верхний слой – 5,1742 см, нижний слой – 4,9496 см
Толщина пакета асфальтобетонных слоев и слоя основания	верхний слой – пакет асфальтобетонных слоев – 10,5 см, нижний слой – шлак	верхний слой – пакет асфальтобетонных слоев (10,065 см), нижний слой – шлак 1 (4,039 см)

Таким образом, предлагаемая схема обработки импульсных сигналов позволяет численно определять диэлектрическую проницаемость слоев, что существенно повышает точность интерпретации радарограмм и снижает долю субъективной оценки оператора при диагностике автомобильных дорог с применением георадаров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diefenderer, B.K. Analysis of full-depth reclamation trial sections in Virginia [Text]: final report / B.K. Diefenderer, A.K. Apeageyi. – VCTIR, 2011. – 54 p.

2. Al-Qadi, L. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar [Text] / L. Al-Qadi, S. Lahouar // *Materials Evaluation*. – 2005. – vol. 63. – №9. – P. 921-925.
3. Cao, Y. Pavement evaluation using ground penetrating radar [Text]: final report / Y. Cao, B.B. Guzina, J.F. Labuz. – University of Minnesota, March, 2008. – 102 p.
4. Гончарский, А.В. Обратные задачи волновой диагностики дорожного полотна [Текст] / А.В. Гончарский, С.Л. Овчинников, С.Ю. Романов // *Вычислительные методы и программирование*. – 2009. – Т. 10. – С. 275-280.
5. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография [Текст] / Под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
6. Jol Harry M. (Editor) *Ground penetrating radar, theory and applications* [Text]. – Elsevier B.V., 2009. – 508 p.

**Батракова Анжелика Геннадьевна**

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, Украина

Кандидат технических наук, доцент кафедры изысканий и проектирования автомобильных дорог и аэродромов

Тел.: +38 (057) 70-73-732

E-mail: agbatr@mail.ru

---

A.G. BATRAKOVA

**EVALUATION THE PAVEMENT STRUCTURAL LAYERS  
THICKNESS WITH GPR**

*The method for determining the thickness of the structural layers of pavement using GPR technology is presented. The proposed methodology relies on pulse signals processing algorithm. The results of field experiments on the testing of the algorithms and techniques on public roads are discussed.*

**Keywords:** *ground penetrating radar, the thickness of the structural layers, the dielectric constant.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Diefenderer, B.K. Analysis of full-depth reclamation trial sections in Virginia [Text]: final report / B.K. Diefenderer, A.K. Apeagyei. – VCTIR, 2011. – 54 p.
2. Al-Qadi, L. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground penetrating radar [Text] / L. Al-Qadi, S. Lahouar // *Materials Evaluation*. – 2005. – vol. 63. – №9. – P. 921-925.
3. Cao, Y. Pavement evaluation using ground penetrating radar [Text]: final report / Y. Cao, B.B. Guzina, J.F. Labuz. – University of Minnesota, March, 2008. – 102 p.
4. Goncharskij, A.V. Obratnye zadachi volnovej diagnostiki dorozhnogo polotna [Tekst] / A.V. Goncharskij, S.L. Ovchinnikov, S.Ju. Romanov // *Vychislitel'nye metody i programmirovanie*. – 2009. – Т. 10. – С. 275-280.
5. Voprosy podpoverhnostnoj radiolokacii: kollektivnaja monografija [Tekst] / Pod red. A.Ju. Grineva. – М.: Radiotehnika, 2005. – 416 s.
6. Jol Harry M. (Editor) *Ground penetrating radar, theory and applications* [Text]. – Elsevier B.V., 2009. – 508 p.

**Batrkova Angelika Gennadieвна**

Kharkov national automobile and highway university, Kharkov, Ukraine

Candidate of technical science, assistant professor of department «Researches and designing highways and airports»

Ph.: +38 (057) 70-73-732

E-mail: agbatr@mail.ru

ЗАЯНЧУКОВСКАЯ Н.В., ЛЕБЕДЕВ Ю.Н.

## ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Предложена организационная схема организации проектных работ при сквозном проектировании теплоэнергетического объекта в условиях интегрированной информационной системы (ИИС) проектирования. Рассмотрены методы и средства создания ИИС, учитывающие современные требования к проекту. Показано, что при таком подходе к организации проектирования сокращаются сроки разработки проекта, устраняются недостатки, повышаются эффективность и качество работ. Приведены количественные оценки экономии времени проектирования по сравнению с традиционной технологией проектирования.

**Ключевые слова:** теплоэнергетический объект, проектирование, интегрированная информационная система.

Теплоэнергетические объекты являются объектами повышенной опасности и отличаются сложной схемой технологических связей, многочисленными внешними связями с другими системами ТЭК (топливно-энергетического комплекса), разнообразием зданий и сооружений различного функционального назначения. Это влечет определенные сложности при проектировании таких объектов (от разработки технического задания до оценки экономической эффективности), учитывающиеся технологическими, экономическими и правовыми нормами [1].

Современное проектирование объектов повышенной опасности представляет сложную организационную систему с большим количеством участников и значительным объемом информационных потоков. Существующую в настоящее время систему организации работы проектных групп при проектировании теплоэнергетических объектов можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 1.

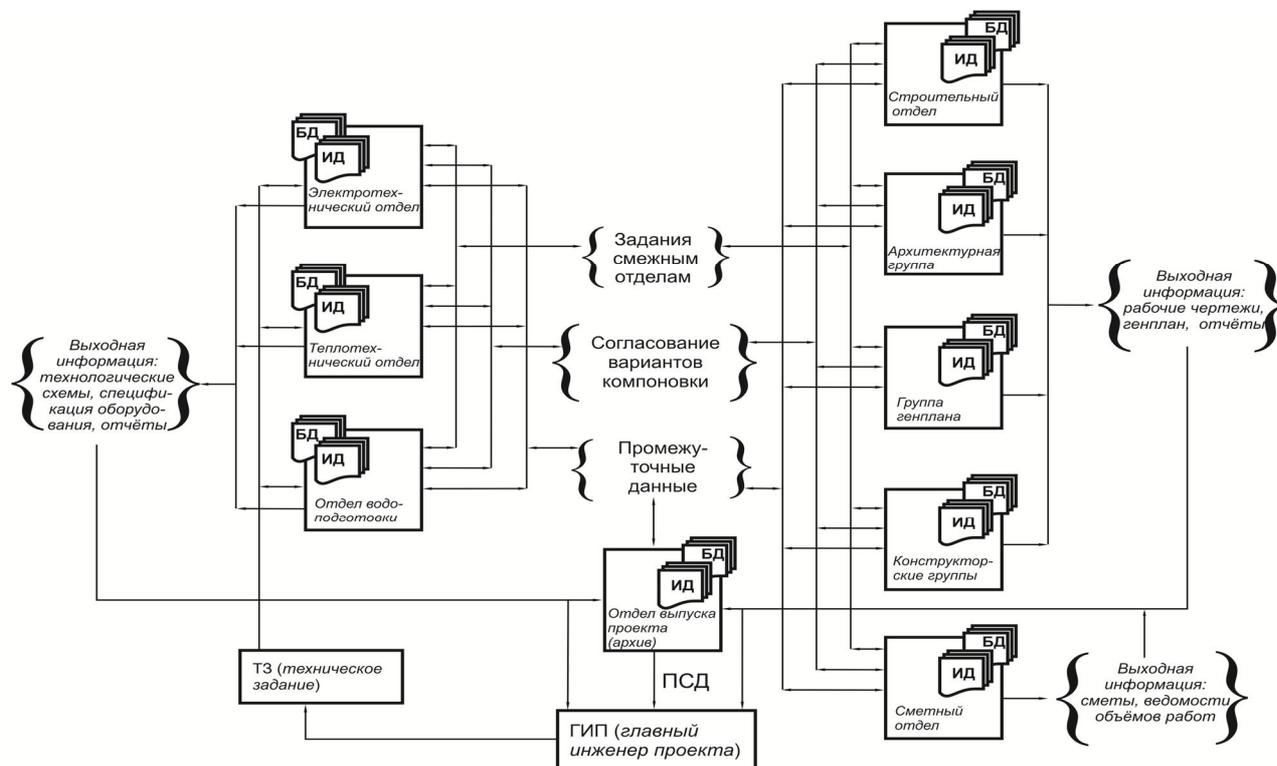


Рисунок 1 – Схема организации проектных работ

При такой организации работ достаточно много времени тратится отделами на согласование и последовательную передачу проектных решений. Выходные данные из всех отделов последовательно передаются в проектные группы и возвращаются в отдел генплана, т.е. пока одна проектная группа не выполнит свою часть проекта, другая не может приступить к работе, что увеличивает общее время разработки проекта.

На данный момент в каждом проектом отделе для решения узконаправленных задач используются несвязанные друг с другом САПР и расчетные программные пакеты. При передаче данных из одной системы проектирования в другую используются либо бумажные носители, либо требуется специальные трансляторы. Использование последних искажает целостную картину проектирования, затрудняет процесс переноса информации из одной САПР в другую и возможность внесения изменений. В этих условиях необходимые изменения вносятся каждой проектной группой непосредственно в применяемой системе проектирования (т.е. отсутствуют ассоциативные автоматизированные связи между разделами проекта). Процесс проектирования теплоэнергетических объектов является итеративным, требующим согласования большого количества проектных данных. При состыковках частей проекта, разработанных в разных САПР, возникают ошибки, искажения информации, которые дублируются и накапливаются по ходу проектирования, и в итоге сказываются на конечном результате. Кроме этого для увязки отдельных частей проекта требуется синхронизация данных.

Анализ функциональных и информационных связей между проектировщиками, информационных потоков между отдельными частями проекта выявил следующие моменты, негативно влияющие на качество и эффективность работ:

- большой поток дублирующей информации в каждом отделе;
- большая итеративность процесса принятия решений;
- отсутствие единого информационного пространства;
- потеря информации при обмене между отделами, в том числе и из-за разности форматов входной и выходной информации.

Таким образом, в данной схеме присутствуют избыточные информационные связи, затрудняющие оценку степени готовности проекта. Обозначенные проблемы приводят к увеличению сроков проектирования, снижению эффективности и качества проектных работ.

В данной работе предлагается изменить организационную и технологическую схемы разработки проекта, исключая отмеченные недостатки, основанную на создании и использовании единого информационного пространства, объединяющего всех разработчиков и других участников процесса. Единое информационное пространство предполагает создание централизованных баз данных, содержащих проектную документацию, одновременно доступных в установленных режимах для использования всеми участниками проекта. Это позволит вести работу над проектом параллельно, что сократит время его разработки. При такой технологии работ устраняются нестыковки между частями проекта, согласования проходят в режиме реального времени. Этот подход соответствует принципам CALS/ИПИ технологий [7].

Разработка такой информационной системы является сложной задачей как в содержательном, так и в техническом плане. В настоящее время не существует программного продукта, который позволял бы автоматизировать разработку всех частей проекта. Как правило, для этого используются специальные САПР.

Более подробно организационно-технологические аспекты процесса проектирования рассмотрим на примере задачи компоновки генерального плана ТЭС, которая заключается в определении оптимального объемно-планировочного варианта размещения основных и вспомогательных зданий и сооружений в соответствии с требованиями нормативно-технических документов [2], [3] и др. При размещении основных и вспомогательных зданий и сооружений ТЭС необходимо учитывать [4]:

- технологическую зависимость вспомогательных служб от основного производства с соблюдением необходимых технологических, санитарных, противопожарных и других норм, регламентирующих расстояние между зданиями, сооружениями и инженерными коммуникациями;
- архитектурное оформление района;

- схему топливного хозяйства и систему технологического водоснабжения;
- максимальную блокировку производственно-вспомогательных зданий и сооружений;
- расположение топливных складов и др.

Главный принцип компоновочных решений генерального плана ТЭС – последовательность технологического процесса. При компоновке генерального плана ТЭС используется блочно-иерархический подход, заключающийся в декомпозиции поставленной задачи на ряд простых взаимосвязанных задач: анализ геоподосновы земельного участка, формирование цифровых моделей местности; планировка площадки: вертикальная и горизонтальная планировка; предварительное размещение на выделенной территории основных и вспомогательных зданий и сооружений ТЭС (площадок под оборудование); предварительная компоновка оборудования в зданиях осуществляется в порядке последовательности технологических операций, а также исходя из геометрических размеров объекта, начиная с оборудования, имеющего наибольшие геометрические размеры; предварительная трассировка, обвязка оборудования и расчет транспортно-трубопроводных систем. Завершающим этапом компоновки генерального плана ТЭС является благоустройство территории и оценка проектных решений.

Для сокращения сроков проектирования информацию о ходе выполнения работ необходимо постоянно собирать, обрабатывать, соединять. Во многом решить эту задачу можно за счет параллельной организации работ. Сократить время на обмен информацией между проектными группами можно путем организации единого информационного пространства (ЕИП). Из обзора литературных источников можно выделить две схемы организации ЕИП: последовательную и параллельную интеграцию САПР. Предпочтение, как правило, отдается последней модели, соответствующей принципам CALS/ИПИ технологий. Для обмена данными между различными САПР в этом случае используется база данных проекта (БДП), в которой хранится вся информация о проекте.

В настоящее время не существует универсального программного продукта, позволяющего в одной системе проектировать сложные промышленные объекты. Поэтому создание ЕИП обеспечивается путем объединения в единую систему сертифицированных программных продуктов трех основных групп – аналитических, конструкторских и расчетных программ.

На рисунке 2 представлена функционально-информационная схема разработки генплана ТЭС на основе интеграции информационных ресурсов проекта в едином информационном пространстве. Предлагаемая технология проектирования позволит устранить такие недостатки, как дублирование информации, нестыковки разных частей проекта, находить согласованные решения на стадии проектирования, экономить время и ресурсы на разработку проекта.

В предлагаемой информационной системе реализуется принцип единичного ввода данных и многократного их использования. Например, такие исходные данные проекта, как:

- климатические данные района строительства (исходных данных о метеорологическом режиме района размещения ТЭС и др.);
- географическое оформление района строительства ТЭС (рельеф, гидрография, подстилающая поверхность и др.);
- архитектурное оформление района строительства;
- тип и габаритные размеры оборудования ТЭС;
- сетка колонн и высота помещений;
- размеры складских помещений

вносятся в БДП один раз и при необходимости могут корректироваться или дополняться.

Представленная на рисунке 2 ИИС позволяет проводить проектирование ТЭС с учетом географического месторасположения объекта, она позволяет проводить многовариантное проектирование как геометрическое (выбор места расположения объектов и размеров зданий), так и конструкторское (выбор типа строительных конструкций).

Компоновка генерального плана ТЭС осуществляется в интерактивном режиме.

Обмен информацией в данной информационной системе и интеграция проектных решений осуществляется через базу данных проекта [7]. Единая модель проекта складывается из множества составляющих, которые динамически меняются в процессе развития проекта. Поэтому при любом изменении входной информации все остальные данные проекта должны динамически изменяться. Элементами БДП являются предметные базы данных: БД оборудова-

ния, БД трубопроводных элементов, БД строительных конструкций, БД ограничений (конструкторские, нормативные, монтажные, экологические и географические), типовые проектные решения и вся промежуточная информация со смежных отделов, получаемая в ходе проектирования, стандарты, научно-практическая информация, каталоги элементов снабжения.

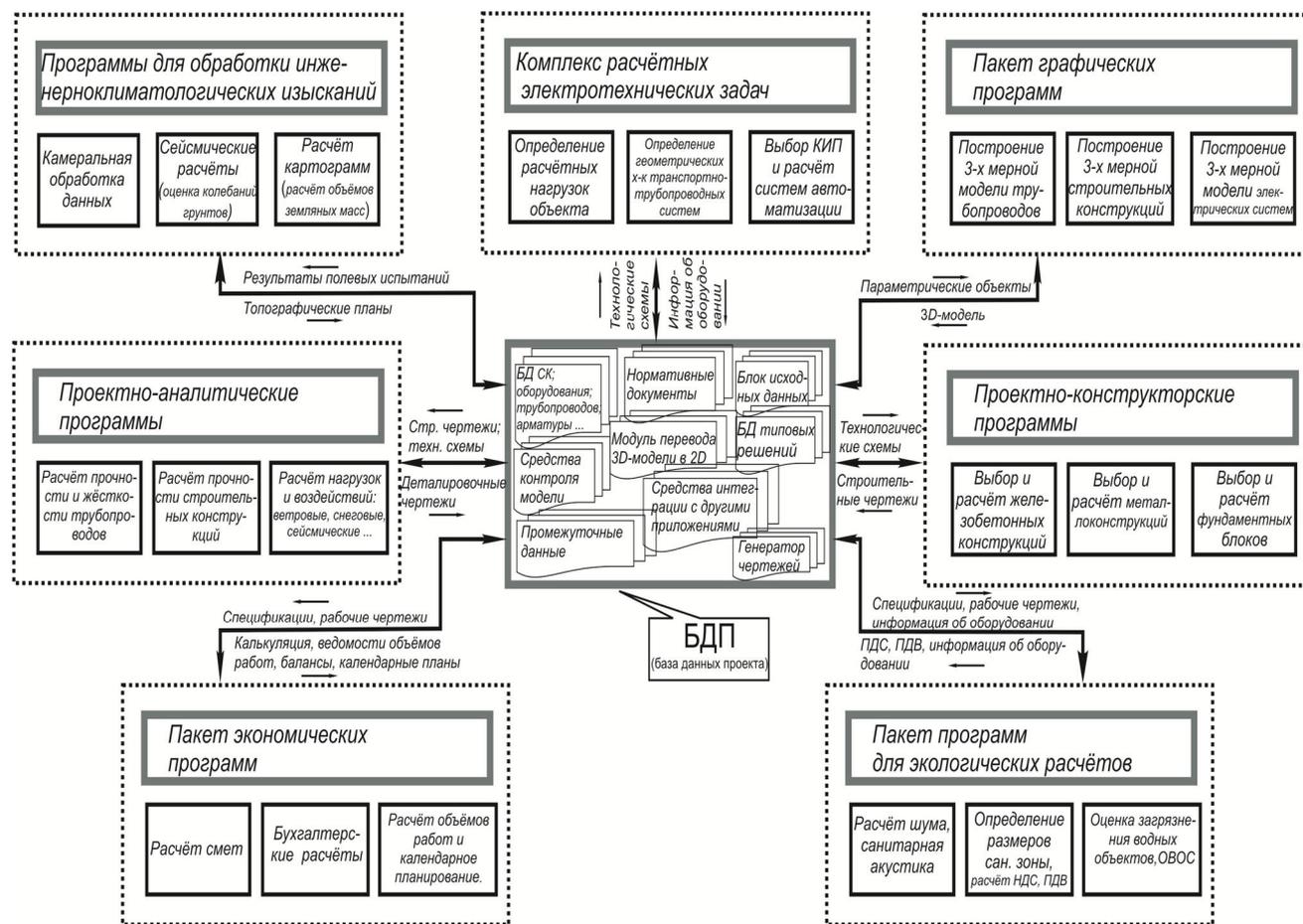


Рисунок 2 – Интегрированная информационная система проектирования

Технология проектирования в условиях интегрированной информационной системы влечет изменение организационной схемы процесса, представленной на рисунке 3.

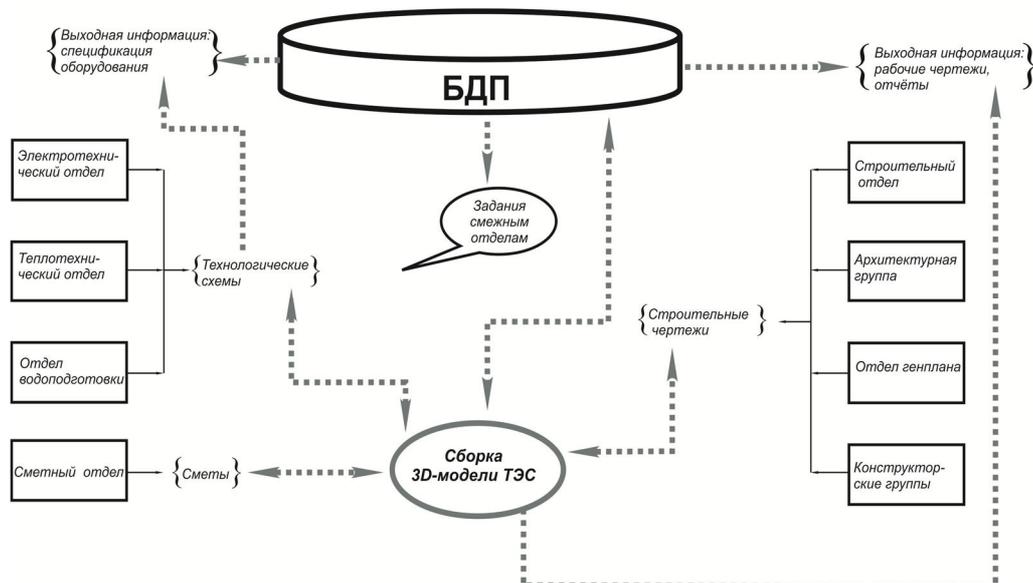


Рисунок 3 – Схема организации проектных работ с использованием ИИС

Схема организации проектных работ с использованием технологий сквозного проектирования (рис. 3) позволяет создавать трехмерные объекты ТЭС. С использованием трехмерной модели производится согласование, принятие проектных решений и автоматизированный поиск коллизий. С использованием трехмерной модели генерируются автоматически выходная информация, отчеты, спецификации, изометрические чертежи. В настоящее время трехмерное моделирование является обязательным при проектировании энергетических объектов [8].

Основная особенность данной схемы организации проектирования – параллельная работа проектировщиков над проектом и автоматическое выявление коллизий. В отличие от традиционной схемы (рис. 1) после первоначальной расстановки оборудования строительный отдел приступает к разработке архитектурно-строительной части проекта. При этом обеспечивается оперативный доступ проектных групп к архивам проектно-графической документации, проектировщик работает только со своей частью проекта, при завершении работ ИИС синхронизирует полученные результаты.

Предлагаемая интегрированная информационная система проектирования позволяет оптимизировать существующую схему взаимодействия проектных групп, сократить сроки проектирования, уменьшить стоимость проекта. В таблице 1 приведены экспертные оценки экономии временных показателей выполнения проектных операций (в %) при использовании представленной интегрированной информационной системы проектирования теплоэнергетических объектов по сравнению с традиционной схемой проектирования.

Таблица 1 – Сокращение времени проектирования теплоэнергетического объекта в условиях ИИС

Показатели	%ое сокращение
Согласование проектных решений (информационное взаимодействие)	более 50
Выполнение однотипных операций проектными группами	более 25
Передача проектных данных (информационный обмен)	более 25
Синхронизация проектных данных	более 40

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пакшин, А.Б. Основы инженерного проектирования теплоэнергетических систем [Текст]: учеб. пособие / А.Б. Пакшин, Е.А. Блинов. – Санкт-Петербург, 2004.
2. СНиП II-89-80\* Генеральные планы промышленных предприятий [Текст].
3. ВСН 34.72.111-92 Инженерные изыскания для проектирования тепловых электрических станций [Текст].
4. Кудинов, А.А. Тепловые электрические станции [Текст]: учеб. пособие / А.А. Кудинов – Самара: Самарский гос. ун-т, 2005. – 163 с.
5. Электронный ресурс // Режим доступа <http://www.gaps.tstu.ru>.
6. Егоров, С.Я. Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств [Текст] / С.Я. Егоров. – М.: Машиностроение – 1, 2007. – 104 с.
7. Кроль, Т.Я. Единая информационная среда проектирования объектов теплоэнергетики [Текст] / Т.Я. Кроль, Н.Б. Ильичева, М.В. Крылов. – Вестник ИГЭУ, вып. 4. – 2005.
8. Каган Джейлан, Б. Информационное моделирование строительства и российская строительная отрасль [Текст] / Б. Каган Джейлан. – Бюллетень, №184. – С. 169-171.

**Заянчуковская Наталия Вячеславовна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация, экономика и управление производством»  
Тел.: +7 (4932) 24-20-30  
E-mail: [zanataly@mail.ru](mailto:zanataly@mail.ru)

**Лебедев Юрий Николаевич**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры «Организация, экономика и управление производством»  
Тел.: +7 (4932) 41-58-71  
E-mail: [yurilebedev@rambler.ru](mailto:yurilebedev@rambler.ru)

## ORGANIZATION AND TECHNOLOGY FOR DESIGN OF THERMAL POWER FACILITIES IN THE CONDITIONS OF INTEGRATED INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT

*Proposed organizational scheme of the organization of project works for end-to-end design of the heat power object in the conditions of an integrated information system (IIS) design. The methods and means of the creation of IMS, taking into account modern requirements to the project. It is shown that in this approach to the organization design of declining terms of project development, incompliance, improved efficiency and quality of work. The article contains quantitative estimates of time-saving design in comparison with the traditional technology of design.*

**Keywords:** heat power object, the design, the integrated information system.

### BIBLIOGRAPHY

1. Pakshin, A.B. Osnovy inzhenernogo proektirovaniya teplojenergeticheskikh sistem [Tekst]: ucheb. posobie / A.B. Pakshin, E.A. Blinov. – Sankt-Peterburg, 2004.
2. SNiP II-89-80\* General'nye plany promyshlennykh predpriyatij [Tekst].
3. VSN 34.72.111-92 Inzhenernye izyskaniya dlja proektirovaniya teplovykh jelektricheskikh stancij [Tekst].
4. Kudinov, A.A. Teplovyje jelektricheskie stancii [Tekst]: ucheb. posobie / A.A. Kudinov – Samara: Samarskij gos. un-t, 2005. – 163 s.
5. Jelektronnyj resurs // Rezhim dostupa <http://www.gaps.tstu.ru>.
6. Egorov, S.Ja. Analiticheskie i procedurnye modeli komponovki oborudovaniya promyshlennykh proizvodstv [Tekst] / S.Ja. Egorov. – M.: Mashinostroenie – 1, 2007. – 104 s.
7. Krol', T.Ja. Edinaja informacionnaja sreda proektirovaniya ob'ektov teplojenergetiki [Tekst] / T.Ja. Krol', N.B. Il'icheva, M.V. Krylov. – Vestnik IGJeU, vyp. 4. – 2005.
8. Kagan Dzhejlan, B. Informacionnoe modelirovanie stroitel'stva i rossijskaja stroitel'naja otrasl' [Tekst] / B. Kagan Dzhejlan. – Bjulleten', №184. – S. 169-171.

#### **Zajanchukovsky Natalia Vjacheslavovna**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo

Candidate of technical sciences, senior lecturer of department «Organization, economy and production management»

Ph.: +7 (4932) 24-20-30

E-mail: zanataly@mail.ru

#### **Lebedev Yuri Nikolaevich**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo

Post-graduate student of department «Organization, economy and production management»

Ph.: +7 (4932) 41-58-71

E-mail: yurilebedev@rambler.ru

МАЛИНИН Г.В.

## ДЕФОРМАЦИЯ МАРТЕНСИТНОЙ НЕУПРУГОСТИ ПРИ СЛОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

*В данной статье представлены результаты систематических компьютерных исследований механического поведения математического объекта, близкого по свойствам к сплаву  $Cu-12\%Al-4,5\%Mn$  при сложных траекториях изотермического нагружения в пространстве напряжений, содержащих участки знакопеременного воздействия. Большое внимание уделяется анализу влияния фазового состава и вида напряженного состояния на деформационные эффекты мартенситной неупругости. Подробно исследуются перекрестные эффекты механоциклической памяти формы. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными опытов.*

**Ключевые слова:** материалы с эффектом памяти формы, сложное знакопеременное нагружение, модель структурно-неоднородной среды.

**Введение.** Материалы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ), могут эффективно использоваться в технологиях строительного производства для создания предварительного напряженного состояния в железобетонных конструкциях, а также в производстве строительных конструкций нового поколения. Для решения указанных задач необходимо иметь адекватные модели, описывающие напряженно-деформированное состояние материалов.

В механике неупругих деформаций знакопеременное нагружение занимает особое место. Часто для новых моделей сред в качестве проверки на адекватность реальным опытам используют именно режимы сложного нагружения, содержащие участки смены знака соответствующих компонент тензора напряжений.

Для материалов, деформирующихся за счет мартенситного канала массопереноса, вопросы деформационного поведения при сложных знакопеременных траекториях нагружения практически не изучены. Проблема усложняется фактором влияния фазового состава. Указанные обстоятельства были учтены при разработке программы компьютерных экспериментов.

**Математическая модель.** В качестве математического объекта исследования использовалась модель структурно неоднородной среды с фазовым каналом массопереноса, изложенная в [1-7]. Рассмотрим основные формулы модели:

$$\dot{T}^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} D_{ik} \dot{\tau}_{ik}, \quad \tau_{ik} = \tau_{31} (\delta_{i1} \delta_{k3} + \delta_{k1} \delta_{i3}); \quad (1)$$

$$\dot{\Phi} = -\dot{T}^* \left\{ \begin{array}{l} H(1 - \Phi_\Sigma) H(-\dot{T}^*) H[M_H - \Phi(M_H - M_K) - T^*] (M_H - M_K)^{-1} + \\ + H(\Phi) H(\dot{T}^*) H[T^* + \Phi(A_K - A_H) - A_K] (A_K - A_H)^{-1} \end{array} \right\}; \quad (2)$$

$$\Phi_\Sigma = \int_0^t \int_{\{\Omega\}} f(\Omega) \dot{\Phi} d\tau d\Omega; \quad (3)$$

$$\dot{\beta}_{ik}^\Phi = A D_{ik} \dot{\Phi}; \quad (4)$$

$$\tau_{ik} = \alpha_{pi} \alpha_{qk} \sigma_{pq}; \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ik}^\Phi = \frac{1}{2} \int_{\{\Omega\}} f(\Omega) (\alpha_{ip} \alpha_{kq}) \dot{\beta}_{pq}^\Phi d\Omega. \quad (6)$$

Здесь  $T^*$  – эффективная температура, определяемая уравнением Клаузиуса-Клапейрона;  $T_0$  – температура термодинамического равновесия;  $q_0$  – тепловой эффект реакции;  $D_{ik}$  – дисторсия превращения;  $\tau_{ik}$  – напряжение от внешних нагрузок;  $\{\Omega\}$  – совокупность угловых координат, определяющих взаимную ориентацию локальной и лабораторной систем отсчета;  $\alpha_{ip}$  – направ-

ляющие косинусы;  $M_n, M_k, A_n, A_k$  – характеристические температуры начала и конца превращения;  $H(x)$  – функция Хевисайда;  $\dot{\Phi}$  – скорость образования мартенситной фазы;  $\Phi$  – удельное количество мартенситной фазы на микроуровне;  $\dot{\beta}_{ik}^\Phi$  – скорость локальной деформации, обусловленной фазовым превращением;  $A$  – коэффициент, чаще всего равный единице;  $\dot{\varepsilon}_{ik}^\Phi$  – скорость макродеформации фазовой природы.

Возможность описания в рамках простейших аналитических соотношений (1-6) большого количества разнообразных экспериментальных проявлений обусловлена отражением в рассматриваемых соотношениях основных физических аспектов формирования фазового механизма массопереноса при обратимых мартенситных реакциях. В частности, микродеформации фазового происхождения  $\beta_{ik}^\Phi$  в рассматриваемой модели фактически отождествляются с симметричной частью дисторсии кристаллографического превращения  $D_{ik}$  (4), а соотношения Клаузиуса-Клапейрона (1) отражают возможность инициирования мартенситных реакций как за счет температурного воздействия, так и с помощью изотермического нагружения.

Параметры модели соответствовали математическому объекту близкому по свойствам к сплаву Cu-12%Al-4,5%Mn (по массе). Все расчеты выполнялись при следующих значениях констант, характеризующих свойства материала:  $q_0=334$  МДж/м<sup>3</sup>,  $T_0=334$  К,  $D_{31}=D_{13}=0,15$  (остальные  $D_{ik}=0$ ),  $M_k=315$  К,  $M_n=327$  К,  $A_n=341$  К,  $A_k=353$  К. Статистические характеристики фазовых превращений описывались функциями плотности распределения  $\varphi(S_\Gamma)$  по ширине гистерезисных фигур, характеризующих кинетику фазовых превращений (рис. 1), а также по их расположению на шкале характеристических температур  $\psi(S_D)$ .

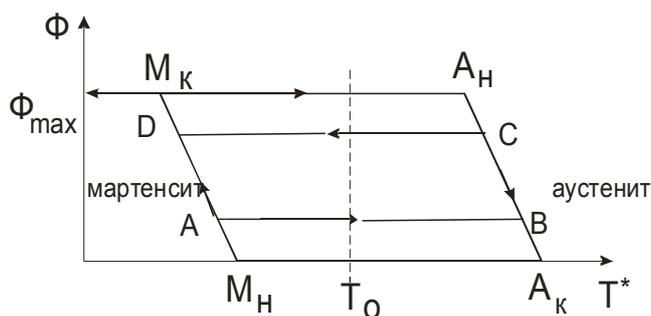


Рисунок 1 – Кинетика фазовых превращений

В качестве аналитических выражений для  $\varphi(S_\Gamma)$  и  $\psi(S_D)$  использовался нормальный закон распределения. Область допустимых отклонений определялась по правилу трех сигм ( $3\sigma$ ). В данном случае для названных статистических распределений принимались одинаковые значения максимальных отклонений  $3\sigma=36$  К.

Таким образом, статистическое поле характеристических температур задавалось двумя независимыми множествами  $\{S_\Gamma\}$  и  $\{S_D\}$ . Флуктуации ширины гистерезиса учтены следующим образом:

$$M_k(S_\Gamma)=M_k+S_\Gamma; M_n(S_\Gamma)=M_n+S_\Gamma; A_n(S_\Gamma)=A_n-S_\Gamma; A_k(S_\Gamma)=A_k-S_\Gamma.$$

Для учета флуктуаций положения центра тяжести гистерезисной фигуры:  $M_k(S_D)=M_k+S_D; M_n(S_D)=M_n+S_D; A_n(S_D)=A_n+S_D; A_k(S_D)=A_k+S_D.$

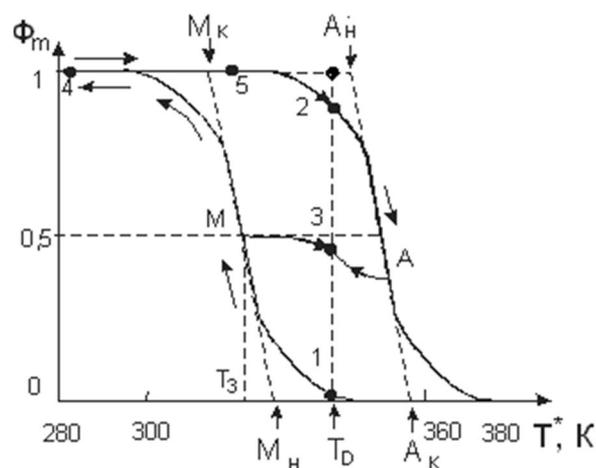
Аккомодационные эффекты на границе раздела фаз учитывались с помощью константы  $A_0$ , которая принималась равной  $A_0=6,7$ , остальные параметры структурно-аналитической модели мезомеханики сред с мартенситными превращениями [2] полагали равными нулю, т.е. рассматривали упрощенный вариант модели [2]. Для проведения численного эксперимента использовалась интегрированная инструментальная среда структурно-аналитической теории (iXSAT) [2].

С целью изучения влияния фазового состава на эффекты мартенситной неупругости математический объект исследовался в трех состояниях: аустенитном, мартенситном и двухфазном. Двухфазный объект формировался таким образом, чтобы в исходном состоянии одновременно присутствовало примерно одинаковое количество фазы аустенита и мартенсита. С

целью исключения влияния температуры значение температуры изотермического нагружения  $T_D$  и методика предварительного температурного воздействия выбирались таким образом, чтобы при одном и том же значении  $T_D$  исследуемый математический объект находился в требуемом фазовом состоянии. Были смоделированы пять режимов предварительного температурного воздействия. Во всех программах, также как и в натурном эксперименте, математический объект вначале нагревался до температуры, соответствующей аустенитному состоянию, в частности, до температуры, превышающей величину  $A_K$  на 30 К, т.е. до  $T_{нар}=383$  К, а затем с помощью предварительных компьютерных экспериментов подбирался режим температурного воздействия в свободном от напряжения состоянии с целью создания в математической среде исходного фазового состава.

На рисунке 2 представлена схема изменения фазового состава при различных режимах предварительного температурного воздействия. Точки 1, 2, 3 на рисунке 2 изображают различные фазовые состояния математического объекта, полученные при соответствующих режимах термообработки: 1 соответствует аустениту, 2 – мартенситу и 3 – двухфазному состоянию.

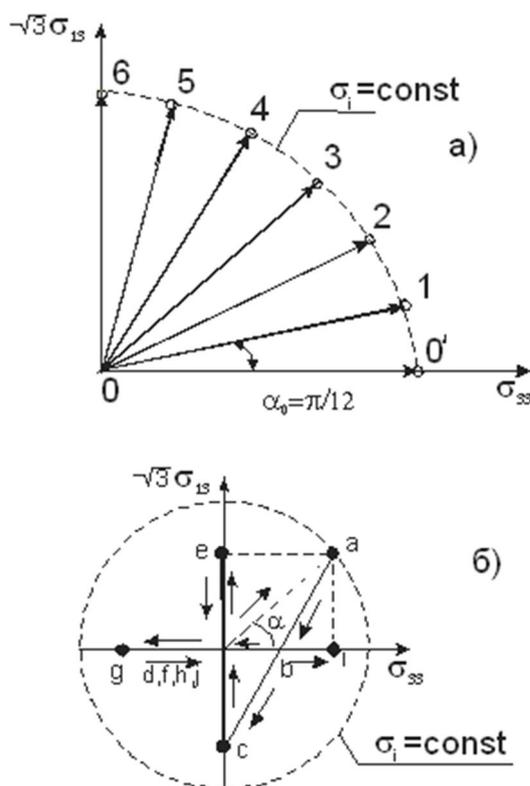
В первой программе экспериментов исследуемый объект охлаждался от температуры  $T_{нач}=383$  К до температуры  $T_D=338$  К, т.е. исходное фазовое состояние соответствовало аустенитному (см. точку 1 на рис. 2). Во второй программе вычислительный эксперимент проводили после соответствующей процедуры изменения температуры. Математический объект, взятый в аустенитном состоянии (при  $T_{нач}=383$  К), вначале охлаждали в свободном состоянии до температуры ниже  $M_K$  на 40 К, т.е. до  $T_{охл}=275$  К, что соответствует мартенситному состоянию, а затем нагревали до температуры  $T_D=338$  К. После такой процедуры математическая среда находилась при заданной температуре  $T_D$  в мартенситном состоянии (см. точку 2 на рис. 2). В третьей программе добивались двухфазного состояния. Анализировалось два варианта создания двухфазного состояния. В первом варианте предварительный температурный режим воздействия содержал этап охлаждения до температуры  $T_3$ , соответствующей точке М на фазовой диаграмме (рис. 2), т.е.  $M_K < T_3 < M_H$ , переводя его в двухфазное состояние примерно с равным количеством аустенита и мартенсита, а затем нагревали до температуры  $T_D$  (рис. 2).



**Рисунок 2 – Схема изменения фазового состава ( $\Phi_m$ ) при различных режимах предварительного температурного воздействия: точка 1 соответствует аустениту; 3 – двухфазному состоянию; 2, 4, 5 – мартенситу.  $T_D$  – температура изотермического нагружения, соответствующая фазовым состояниям 1, 2, 3**

Второй вариант создания двухфазного состояния предусматривал следующие этапы температурного воздействия. Вначале объект, находящийся в аустенитном состоянии, при  $T=T_{нач}$  охлаждали до температуры  $T_{охл}$ , переводя его полностью в мартенсит, затем производили нагрев до температуры выше  $A_H$  так, чтобы появилась аустенитная и мартенситная фазы примерно в одинаковом количестве. Окончание этапа нагрева соответствовало точке А на фазовой диаграмме (рис. 2). На последнем этапе проводилось охлаждение до заданной температуры изотермического деформирования  $T_D$ .

Кроме названных программ компьютерных испытаний математический объект исследовался в мартенситных состояниях при различных температурах. В частности, в четвертой программе температура деформирования соответствовала  $T_D=280$  К (точка 4 на рис. 2), в пятой –  $T_D=318$  К (точка 5 на рис. 2). Каждая программа вычислительного эксперимента содержала семь режимов изотермического воздействия по заданным траекториям в пространстве напряжений  $\sigma_{33}-\sqrt{3}\sigma_{13}$ . Таким образом, было исследовано тридцать пять режимов нагружения. Для наглядности на рисунке 3 изображены схемы траекторий нагружения. Согласно рисунку 3, а, где изображены траектории первого звена, режимы 0-0' и 0-6 соответствует знакопеременному растяжению-сжатию (0-0') и знакопеременному симметричному сдвигу (0-6). Причем, максимальная амплитуда изменения интенсивности напряжения  $\sigma_i$  ( $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{33}^2 + 3\sigma_{13}^2}$ ) в названных режимах задавалась одинаковой.



**Рисунок 3 – Схема траекторий изотермического нагружения:**  
 а – пропорциональные траектории 1-го звена (oa); б – многозвенная траектория изотермического нагружения; α – угол наклона первого звена, принимающий значения  $0^0(0), \pi/12(1), \pi/6(2), \pi/4(3), \pi/3(4), 2/3\pi(5), \pi/2(6)$ .

Точке а соответствует для всех значений угла α  $\sigma_i=300$  МПа

Траектории нагружения 0-1, 0-2, 0-3, 0-4, 0-5 представляют однотипные многозвенные траектории, в которых варьировался угол наклона α первого звена траектории, а также амплитуда изменения компонент нормального  $\sigma_{33}$  и касательного  $\sqrt{3}\sigma_{13}$  напряжений. На рисунке 3, б изображена типовая траектория нагружения. Для удобства анализа последовательность звеньев траектории обозначена символами латинского алфавита a, b, c, ... j. Угол наклона первого звена траектории соответствовал значению  $\alpha=0$  (0 – режим),  $\alpha=\pi/12$  (1 – режим),  $\alpha=\pi/6$  (2 – режим);  $\alpha=\pi/4$  (3 – режим);  $\alpha=\pi/3$  (4 – режим);  $\alpha=2\pi/3$  (5 – режим); и  $\alpha=\pi/2$  (6 – режим).

Используя схему, изображенную на рисунке 3, б, прокомментируем траекторию нагружения. Начальное звено 0-0' на рисунке 3, б характеризует пропорциональное нарастание нормального  $\sigma_{33}$  и касательного  $\sqrt{3}\sigma_{13}$ , до фиксированного (для всех режимов 0-0', 0-1 ... 0-6) значения интенсивности напряжений  $\sigma_i=300$  МПа.

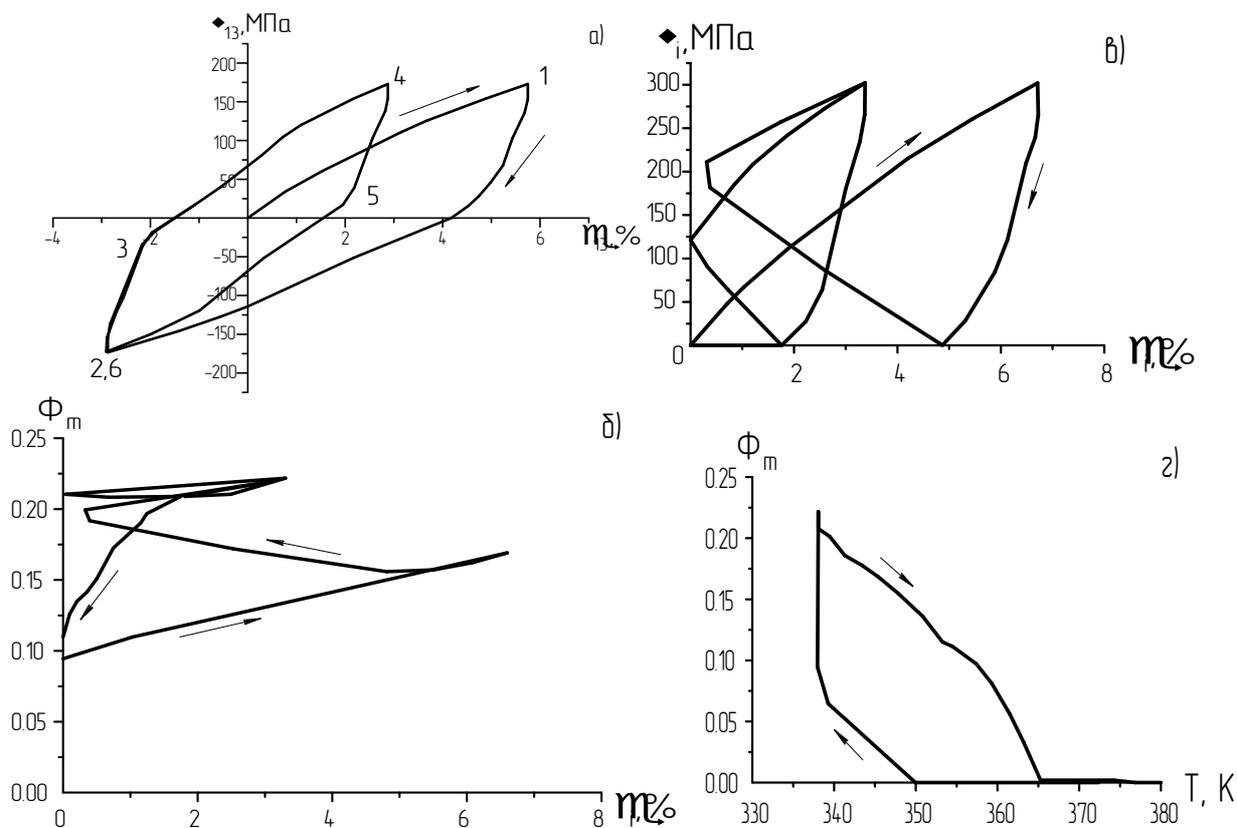
В точке «а» происходит резкий излом траектории нагружения и на участке *a-b* реализуется пропорциональная разгрузка по обеим компонентам тензора напряжений  $\sigma_{33}$  и  $\sqrt{3}\sigma_{13}$ . В момент, соответствующий точке «b», компонента  $\sqrt{3}\sigma_{13}$  достигает нулевого значения и далее на участке *b-c* происходит смена знака касательного напряжения. В момент, соответствующий точке «с», компонента  $\sigma_{33}$  обращается в ноль, а величина  $\sqrt{3}\sigma_{13}$  достигает по модулю значения равного сдвиговому напряжению в точке «а». Далее при  $\sigma_{33}=0$  производится знакопеременное нагружение касательным напряжением  $\sqrt{3}\sigma_{13}$  по симметричному режиму в полном соответствии с траекторией *c-d-e-f*. В точке «f», соответствующей значению  $\sqrt{3}\sigma_{13}=\sigma_{33}=0$ , режим нагружения сменялся на симметричный знакопеременный по компоненте нормального напряжения  $\sigma_{33}$  (при условии, что  $\sqrt{3}\sigma_{13}=0$ ) с амплитудой равной значению  $\sigma_{33}$  в точке «а», соответствующей концу первого звена траектории нагружения. Обозначенный участок траектории соответствует последовательности *f-g-h-i-j*. Режимы нагружения с первого по пятый выполнялись согласно описанной траектории и отличались заданием угла наклона ( $\alpha$ ) первого звена траектории и амплитудами напряжений  $\sigma_{33}$  и  $\sigma_{13}$ . Во всех опытах после окончания изотермического нагружения производился нагрев в свободном состоянии до температуры  $T=T_{\text{наг}}$ . При такой траектории нагружения удастся изучить влияние сдвигового и нормального напряжений на формирование знакопеременной деформации, а также перекрестные эффекты деформации.

Рассмотрим результаты численных экспериментов над математическим объектом, испытанным в условиях знакопеременного циклического нагружения сдвиговым напряжением и амплитудой изменения интенсивности напряжений  $\sigma_i=300$  МПа, т.е. 6-ой режим согласно классификации, изображенной на рисунке 3, а. Исследуем влияние фазового состава на диаграммы знакопеременной деформации. Анализ выполним для трех исходных состояний объекта: аустенитного мартенситного и двухфазного. Режим циклического нагружения удобно представлять в виде параметров характеризующих циклы и соответствующие полуциклы нагружения [3]. Будем в дальнейшем обозначать амплитуду деформации на первом полуцикле символом  $\varepsilon_{13}^{(1)}$ , на втором –  $\varepsilon_{13}^{(2)}$ , на третьем –  $\varepsilon_{13}^{(3)}$ , на четвертом –  $\varepsilon_{13}^{(4)}$ , соответственно. Остаточную деформацию после первого полуцикла (при  $\sigma_{13}=0$ ) обозначим как  $\varepsilon_{13}^{(1)}(0)$ , после второго –  $\varepsilon_{13}^{(2)}(0)$ , после третьего –  $\varepsilon_{13}^{(3)}(0)$ , после четвертого –  $\varepsilon_{13}^{(4)}(0)$ .

Результаты компьютерного эксперимента для аустенитного состояния в условиях изотермического нагружения при температуре испытания  $T_D=338$  К представлены на рисунке 4. На этом рисунке, с целью более глубокого анализа закономерностей формирования эффектов мартенситной неупругости, приведены четыре диаграммы, отражающие различные аспекты физико-механического поведения объекта в аустенитном состоянии. График зависимости сдвигового напряжения  $\sigma_{13}$  и угловой деформации фазовой природы  $\varepsilon_{13}$ , представлен на рисунке 4, а. Для удобства анализа на данном рисунке, а также на всех последующих диаграммах деформации упругая деформация не приводится. Для ее учета необходимо выполнить расчеты по формулам [1, 2], используя закон Гука для макромасштабного уровня.

На рисунке 4, г изображена диаграмма изменения мартенситной фазы макромасштабного уровня  $\Phi_m$  в зависимости от температуры  $T$ . Анализируя результаты расчета, приведенные на рисунке 4, можно отметить следующие характерные особенности деформации мартенситной неупругости. Согласно рисунку 4, а, деформация возникает с начального момента нагружения, т.е. фазовый предел текучести в этом случае равен нулю. Участок диаграммы активной деформации имеет двухстадийный характер, причем на первой стадии возникает параболическое упрочнение, которое на второй стадии сменяется линейным. На этапе разгрузки вначале наблюдается упругая деформация (на рисунке 4, а данный этап изображен вертикальной линией, характеризующей уменьшение напряжения), которая сменяется линией с участком ярко выраженного псевдоупругого возврата. В результате эффекта псевдоупругости фазовая деформация от значения  $\varepsilon_{13}^{(1)}=5,73\%$  (при максимальном значении сдвигового напряжения  $\sigma_{13}$ ) уменьшилась до величины  $\varepsilon_{13}^{(1)}(0)=3,97\%$  при  $\sigma_{13}=0$ , т.е. коэффициент псевдоупругости

КПУ  $\tau = \varepsilon_{13}^{(1)} / \varepsilon_{13}^{(1)}(0) = 1,44$ . При смене знака сдвигового напряжения на втором полуцикле наблюдаются двухстадийное упрочнение и аналогичный характер псевдоупругого возврата, возникающего при разгрузке.



**Рисунок 4 – Диаграммы механического поведения модельного объекта в аустенитном состоянии при изотермическом ( $T_D=338$  К) симметричном знакопеременном сдвиговом нагружении: а – зависимость  $\sigma_{13}-\varepsilon_{31}$ ; б – зависимость удельной макроскопической фазы  $\Phi_m$  от интенсивности деформации  $\varepsilon_i$ ; в – зависимость  $\varepsilon_i$  от интенсивности напряжений  $\sigma_i$ ; г – зависимость  $\Phi_m$  от температуры  $T$**

Анализ циклических особенностей деформации мартенситной неупругости позволяет отметить следующие характерные закономерности. На первом цикле симметричного знакопеременного нагружения исследуемый объект демонстрирует ярко выраженное анизотропно-упрочняющиеся состояние [3], которое проявляется в резком уменьшении амплитуды деформации от величины равной 5,79% в первом полуцикле до 2,95% во втором, т.е. коэффициент циклического упрочнения  $KЦУ\tau = \varepsilon_{13}^{(1)} / \varepsilon_{13}^{(3)}$  увеличился почти в три раза ( $KЦУ\tau=1,94$ ). Последующее циклическое нагружение сопровождается практически изотропной, циклически стабильной диаграммой деформации с максимальной и минимальной амплитудами деформации 2,95% и 2,91% и шириной гистерезиса деформации равной  $\Delta\varepsilon_{13} = 3,11\%$  (при  $\sigma_{13}=0$ ). Характерно, что в циклически стабильном состоянии на участках активного нагружения наблюдается фактически одна стадия упрочнения.

Вызывает интерес кинетика изменения фазового состава, которая представлена зависимостью  $\Phi_m = \Phi_m(\varepsilon_i)$  (рис. 4, б) и графиком  $\Phi_m = \Phi_m(T)$  (рис. 4, г). При анализе рисунков видно, что уже в исходном состоянии до приложения нагрузки при температуре деформирования  $T_D > M_n$ , в моделируемой среде (за счет структурной неоднородности и статистических свойств характеристических температур) имеются зародыши мартенситной фазы, составляющие примерно 0,09%, что обеспечивает при изотермическом нагружении инициирование прямой мартенситной реакции (А→М) сразу по мере приложения сдвиговых напряжений и объясняет появление нулевого предела фазовой текучести. При дальнейшем увеличении сдвигового напряжения фазовые деформации возникают за счет инициирования преимущественно пря-

мой мартенситной реакции, что проявляется в возрастании макроскопической доли мартенситной фазы  $\Phi_m$  (см. рис. 4, б). Основное увеличение  $\Phi_m$  наблюдается в первом цикле нагружения, а во втором и последующих происходит стабилизация гистерезиса фазового превращения в координатах  $\Phi_m = \Phi_m(\varepsilon_i)$ . Отметим, что на этапе разгрузки и последующего нагружения сдвиговым напряжением противоположного знака наблюдается незначительное уменьшение мартенситной фазы  $\Phi_m$ , что свидетельствует о преобладании на макроуровне процесса обратной мартенситной реакции ( $M \rightarrow A$ ). На участке, где  $\Phi_m = \text{const}$ , а  $\varepsilon_i$  существенно уменьшается, происходят одновременно процессы прямой  $A \rightarrow M$  и обратной  $M \rightarrow A$  реакций в различных микрообъемах примерно с одинаковой производительностью, т.е. имеет место перераспределение аустенитной и мартенситной фаз на различных локальных участках кристаллов без изменения величины макроскопической фазы. Таким образом, формирование нетривиальных свойств мартенситной неупругости при циклическом нагружении определяется сложной кинетикой мартенситных реакций в микрообъемах в условиях, когда в одних объемах инициируется прямая  $A \rightarrow M$  мартенситная реакция, в других – обратная  $M \rightarrow A$ , а макроскопические свойства формируются как статистическое проявление указанных фазовых превращений. Весьма показательна диаграмма деформаций в координатах  $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\sigma_i)$ , представленная на рисунке 4, в. Видим, что имеет место сложная и многозначная зависимость.

**В заключение** отметим, что сравнительный анализ физико-механических проявлений математических объектов, находящихся в различных фазовых состояниях при циклическом сдвиговом нагружении, позволил отметить нетривиальный характер деформационных эффектов мартенситной неупругости, а также существенное влияние исходного фазового состава и совершенное отсутствие инвариантности соотношений  $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\sigma_i)$  от вида напряженного состояния. С практической точки зрения эти исследования стимулируются тем, что полученные результаты резко расширяют возможности применения сплавов, обладающих эффектом памяти формы, позволяя создавать элементы и устройства с принципиально новыми функциональными свойствами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев, В.А. Структурно-аналитическая теория прочности [Текст] / В.А. Лихачев, В.Г. Малинин. – СПб.: Наука, 1993. – 472 с.
2. Малинина, Н.А. Развитие теории физической мезомеханики для сред с мартенситным механизмом массопереноса [Текст] / Н.А. Малинина, В.Г. Малинин, Г.В. Малинин // Вестн. НовГУ. сер. Естеств. и техн. науки, 1999. – №13. – С. 39-49.
3. Малинин, В.Г. Механические свойства материалов с эффектом памяти формы при сложных режимах изотермического нагружения [Текст] / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин / Приложение к Инженерному журналу: Справочник. – Москва: Машиностроение, 2002. – №10. – Ч. 1. – 27 с.; №10. – Ч. 2. – 25 с.
4. Малинин, В.Г. Вариант структурно-аналитической мезомеханики, учитывающий волновой характер деформаций, инициируемых мартенситными превращениями [Текст] / В.Г. Малинин, Г.В. Малинин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – №2 (40). – С. 49-55.
5. Rusinko, A., Rusinko, K. Plasticity and creep of metals, Springer, Berlin, 2011.
6. Rusinko, A. Ultrasound and irrecoverable deformation in metals, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
7. Rusinko, A. Non-classical problems of irreversible deformation in terms of the synthetic theory, Acta Polytechnica Hungarica 7: 25-62, 2010.

### Малинин Георгий Владиславович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»  
Тел.: +7 (4862) 41-98-13  
E-mail: malinin2002@yandex.ru

G.V. MALININ

## DEFORMATION OF UNELASTICITY BY MARTENSITNA AT DIFFICULT TRAJECTORIES OF ISOTHERMAL LOADING IN MATERIALS WITH EFFECT OF SHAPE MEMORY OF A FORM

*In given article results of regular computer researches of mechanical behaviour of the mathematical object close on properties to alloy Cu-12%Al-4,5%Mn are presented, at complex trajectories isothermal loading in space of the pressure containing sites of sign-variable influence. The big attention is given the analysis of influence of phase structure and a kind of the intense condition on deformation effects martensitital plasticity. Cross effects mechanical-cyclic memories of the form are in detail researched. The received results are in good conformity with data of experiences.*

**Keywords:** *materials with effect of memory of the form, complex sign-variable loading, model of the structurally-non-uniform environment.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Lihachev, V.A. Strukturno-analiticheskaja teorija prochnosti [Tekst] / V.A. Lihachev, V.G. Malinin. – SPb.: Nauka, 1993. – 472 s.
2. Malinina, N.A. Razvitie teorii fizicheskoy mezomehaniki dlja sred s martensitnym mehanizmom masopere nosa [Tekst] / N.A. Malinina, V.G. Malinin, G.V. Malinin // Vestn. NovGU. ser. Estestv. i tehn. nauki, 1999. – №13. – S. 39-49.
3. Malinin, V.G. Mehanicheskie svojstva materialov s jeffektom pamjati formy pri slozhnyh rezhimah izotermicheskogo nagruzhenija [Tekst] / V.G. Malinin, N.A. Malinina, G.V. Malinin / Prilozhenie k Inzhenernomu zhurnalu: Spravochnik. – Moskva: Mashinostroenie, 2002. – №10. – Ch. 1. – 27 s.; №10. – Ch. 2. – 25 s.
4. Malinin, V.G. Variant strukturno-analiticheskoy mezomehaniki, uchityvajushhij volnovoj harakter deformatsij, iniciiruemyh martensitnymi prevrashhenijami [Tekst] / V.G. Malinin, G.V. Malinin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №2 (40). – S. 49-55.
5. Rusinko, A., Rusinko, K. Plasticity and creep of metals, Springer, Berlin, 2011.
6. Rusinko, A. Ultrasound and irrecoverable deformation in metals, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
7. Rusinko, A. Non-classical problems of irreversible deformation in terms of the synthetic theory, Acta Polytechnica Hungarica 7: 25-62, 2010.

### **Malinin Georgij Vladislavovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Candidate of technical sciences, associate professor of department «Dynamics and durability of cars»

Ph.: +7 (4862) 41-98-13

E-mail: malinin2002@yandex.ru

САХАРОВ А.А., ФЕДОСОВ С.В., ЕЛИН Н.Н., МИЗОНОВ В.Е.

## ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ЗАМЕРЗАНИЯ ВЛАГИ В ПЛОСКОЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ СТЕНКЕ

Предложена нелинейная ячеечная математическая модель теплопередачи через плоскую стенку, в которой содержится влага, претерпевающая фазовые переходы «замерзание-оттаивание». Модель построена на универсальном вычислительном алгоритме, использующем математический аппарат теории цепей Маркова и позволяющем рассчитывать переходные и стационарные тепловые процессы в стенке с учетом замерзания и оттаивания влаги. Приведены примеры расчета формирования фронта промерзания при различных внешних условиях.

**Ключевые слова:** плоская стенка, ячеечная модель, теплопроводность, замерзание влаги, фронт промерзания.

Промерзание стен и покрытий происходит весьма часто, особенно в зданиях из тонкостенных многослойных конструкций, получивших большое распространение. Это вызывается либо неправильным их конструированием и, как следствие, образованием тепловых мостиков, либо увлажнением конструкций и повышением в результате этого их теплопроводности. Причиной промерзания могут стать также ошибки в определении толщины стен и покрытий или их утеплителя. Поэтому достоверное расчетное прогнозирование замерзания и оттаивания влаги в ограждающих конструкциях является актуальной научной и практической задачей [1]. Применение для этой цели классических методов аналитической теории теплопроводности далеко не всегда может удовлетворить потребности проектировщиков. Особенно это проявляется при решении задач тепломассопереноса, сопряженного с фазовыми переходами в материале, например, замерзания влаги или оттаивания замерзшей влаги. Ниже предложена ячеечная модель нелинейной теплопередачи с фазовыми переходами через плоскую стенку, хорошо зарекомендовавшая себя при моделировании других тепловых процессов в строительной индустрии. Процедура построения ячеечной модели показана на рисунке 1 [2, 3].

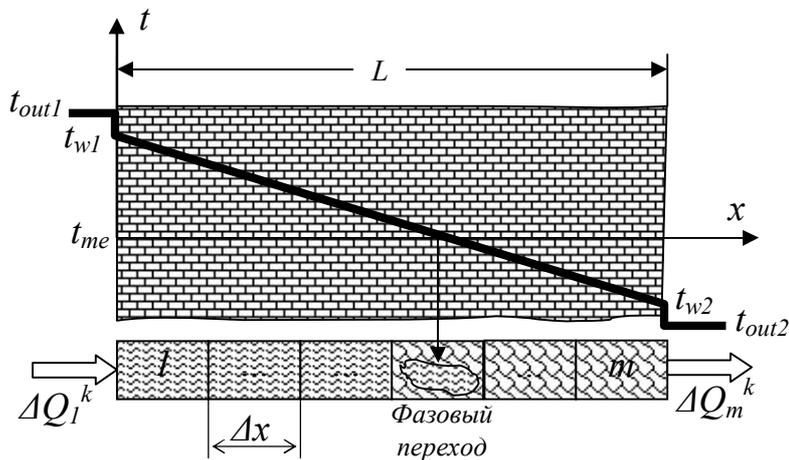


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса и его ячеечная модель

Всю толщину  $L$  стенки, в которой происходит одномерный процесс теплопроводности, разбивают на  $m$  ячеек длиной  $\Delta x = L/m$  и площадью поперечного сечения  $S$ . Все теплофизические свойства и параметры процесса считаются равномерно распределенными по каждой ячейке и могут быть представлены векторами-столбцами размером  $m \times 1$ . Расчет ведется для единичного поперечного сечения стенки. Состояние процесса рассматривается через малые промежутки времени  $\Delta \tau$  и фиксируется в дискретные моменты времени  $\tau_k = (k-1)\Delta \tau$ , где  $k$  – номер временного перехода. Преобразование вектора теплоты в течение перехода описывается рекуррентным матричным равенством:

$$Q^{k+1} = P(Q^k + \Delta Q_e^k \pm \Delta Q_{ph}^k), \quad (1)$$

где  $Q^{k+1}$  и  $Q^k$  – последующее и текущее распределение теплоты по ячейкам;  $\Delta Q_e^k$  – вектор теплоты, передаваемой крайним ячейкам цепи от окружающей среды путем теплоотдачи;  $\Delta Q_{ph}^k$  – вектор теплоты фазового перехода, имеющий ненулевое значение в той ячейке, где этот переход происходит;  $P_Q$  – матрица теплопроводности для теплоизолированной по краям цепи.

Дополнительно процесс характеризуется вектором содержания замерзшей влаги в ячейках  $M^k$ . Минимальное значение его элементов равно нулю (в ячейках присутствует влага только в капельном состоянии), максимальное –  $M_{jmax}$  (масса полностью замерзшей в ячейке влаги).

При отсутствии фазовых переходов вектор температуры  $t$  связан с вектором теплоты  $Q$  формулой:

$$t^k = Q^k ./ c ./ \rho ./ S ./ dx, \quad (2)$$

где  $c$  и  $\rho$  – векторы теплоемкостей и плотностей, а оператор  $./$  означает поэлементное деление векторов.

Рассмотрим процедуру расчета входящих в равенство (1) векторов и операторов. Элементы вектора внешнего теплообмена  $\Delta Q_e^k$  рассчитываются следующим образом:

$$\Delta Q_{e1}^k = \alpha_1 (t_{out1}(k) - t_1^k) S \Delta \tau, \quad (3)$$

$$\Delta Q_{em}^k = \alpha_m (t_{out2}(k) - t_m^k) S \Delta \tau, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_m$  – коэффициенты теплоотдачи, а температуры окружающей среды с обеих краев стенки считаются в общем случае зависящими от времени через номер временного перехода  $k$ .

Специфической особенностью моделируемого процесса является выделение или поглощение теплоты  $\Delta Q_{ph}^k$  при протекании фазового перехода, а также поведение температуры ячейки в его процессе. После каждого временного перехода температура во всех ячейках сравнивается с температурой фазового перехода  $t_{ph}$  (температурой замерзания). Если происходит охлаждение  $j$ -й ячейки, то есть  $t_j^{k+1} < t_j^k$ , и оказывается, что  $t_j^{k+1} < t_{ph}$  и  $M_j^k < M_{jmax}$  (замерзла не вся влага), то принимается, что  $t_j^{k+1} = t_{ph}$ , а теплота  $\Delta Q_{phj} = c\rho(t_j^{k+1} - t_j^k)S\Delta x$  на формирование твердой фазы (льда), масса которой в конце перехода составит:

$$M_j^{k+1} = M_j^k + \Delta Q_{phj}/r, \quad (5)$$

где  $r$  – удельная теплота замерзания влаги.

Если окажется, что после очередного перехода  $M_j^{k+1} > M_{jmax}$  (замерзла вся влага),  $M_j^{k+1}$  приравнивается к  $M_{jmax}$  и фазовый переход в этой ячейке заканчивается, а дальнейшая эволюция теплоты и температуры в ней контролируется только матрицей теплопроводности. При нагреве ячейки, содержащей полностью или частично твердую фазу, идет противоположный процесс таяния льда, контролируемый в модели зависимостями, описанными выше.

При изменении фазового состояния влаги в ячейках ее теплофизические свойства меняются, а теплопроводность становится нелинейной. Правила построения матрицы нелинейной теплопроводности подробно описаны в работе [1]. Здесь, чтобы не загромождать описание подробностями ее построения, ограничимся случаем постоянства теплофизических свойств, когда матрица теплопроводности постоянна и имеет вид:

$$P_Q = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $d = \lambda \Delta \tau / (\rho c \Delta x^2)$ , а  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Выражение (6) замыкает определение всех величин, входящих в рекуррентное равенство (1), по которому теперь можно рассчитывать эволюцию распределения теплоты, температуры и содержания влаги в различных фазовых состояниях при различных условиях. Расчеты выполняются на базе универсального вычислительного алгоритма, особенно удобного для реализации в среде MATLAB.

На рисунках 2-4 показаны примеры расчетов, демонстрирующих работоспособность и возможности модели. Рисунок 2 иллюстрирует изменение распределения температуры в стенке при наличии замерзания влаги, когда температура наружного воздуха скачком меняется от 0 до минус 10°C. На рисунке 2, а показано все изменение до перехода в новое установившееся состояние, а на рисунке 2, б – его начальная стадия, когда начинается замерзание влаги в наружных ячейках.

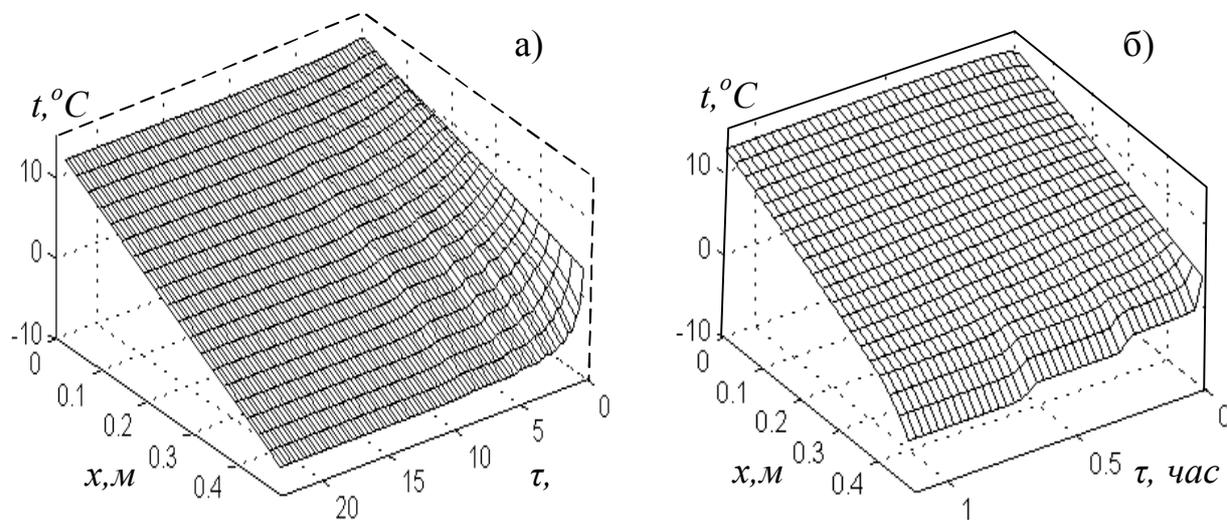


Рисунок 2 – Эволюция распределения температуры (а) и ее фрагмент на начальной стадии охлаждения и замерзания (б) при скачкообразном снижении внешней температуры ( $L=0,5$  м;  $\rho=1900$  кг/м<sup>3</sup>;  $c=837$  Дж/(кг·°К);  $\alpha_1=\alpha_2=5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°К);  $\lambda=$  Вт/(м·°К))

Ступенчатый характер изменения температуры обусловлен тем, что фазовый переход может происходить только в одной ячейке. Постоянная температура фазового перехода «запирает» следующие ячейки от проникновения холода до тех пор, пока фазовый переход не завершится полностью, т.е. в ячейке не замерзнет вся имевшаяся влага. Более наглядно это видно на рисунке 3, где показано накопление массы льда в наружных ячейках, соответствующее промерзанию стенки. Данные представлены в виде трехмерного (а) и контурного (б) графиков.

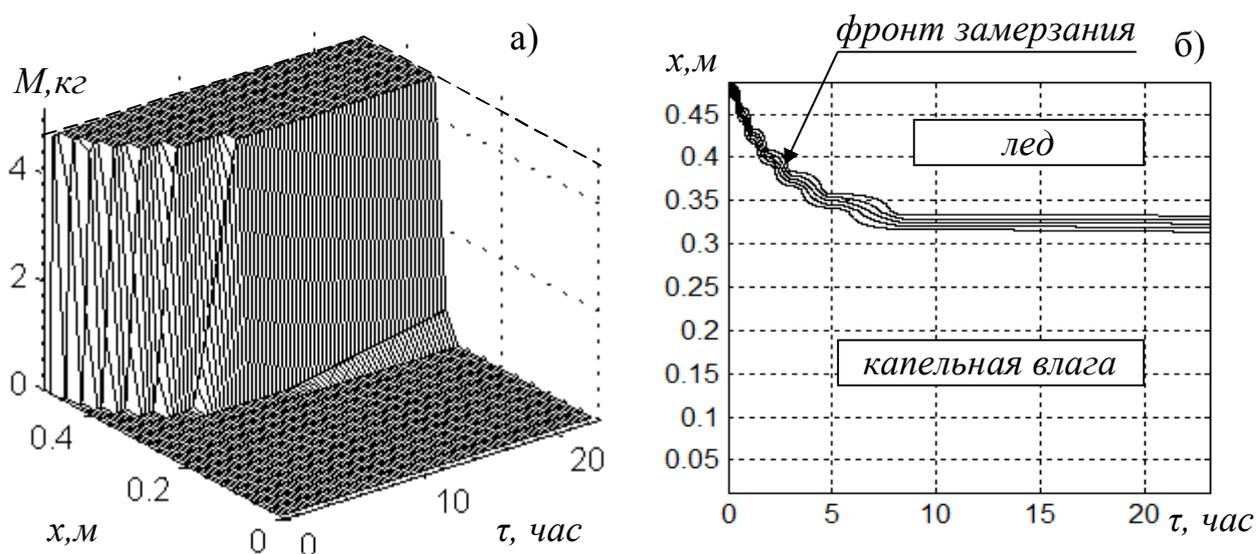


Рисунок 3 – Эволюция распределения содержания замерзшей влаги (а – 3D график, б – контурный график) при скачкообразном снижении внешней температуры

Линии на контурном графике, лежащие между ограничивающими линиями, соответствуют разному содержанию льда и капельной влаги в ячейках. В установившемся процессе полностью промерзают четыре наружных ячейки, а в пятой находятся влага и лед одновременно. Увеличение числа ячеек  $m$  в модели (уменьшение  $\Delta x$ ) приводит к сужению интервала между ограничивающими линиями, но в целом фронт промерзания остается на том же месте.

При эксплуатации ограждающих конструкций важную роль играют циклы промерзания и оттаивания, когда температура окружающей среды периодически переходит температуру фазового перехода. Модель позволяет эффективно отслеживать изменение теплофизического и фазового состояния стенки при меняющейся внешней температуре. Пример моделирования такого процесса показан на рисунке 4, где внешняя температура сначала скачком убывает от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-10^{\circ}\text{C}$ , а затем спустя некоторое время скачком возвращается к  $0^{\circ}\text{C}$ . При обратном повышении температуры происходит относительно быстрый прогрев внешней зоны стенки до температуры фазового перехода и во внутренних ячейках цепи начинается таяние льда (рис. 4, а). Оно блокирует повышение температуры в более близких к внешнему краю стенки ячейках до тех пор, пока все ячейки окажутся свободными ото льда (рис. 4, а). Далее идет прогрев стенки уже без фазовых переходов путем обычной теплопроводности. Формирование и таяние льда наглядно видны на рисунке 4, б, в. Фронт промерзания сначала распространяется вглубь стенки, достигая установившегося положения, а затем после повышения внешней температуры отступает к внешнему краю стенки, полностью исчезая через 17 часов с начала моделируемого цикла. Естественно, что в модели может быть использован любой график изменения внешней и внутренней температуры, задаваемой в равенствах (3), (4) функциями  $t_{out2}(k)$  и  $t_{out1}(k)$ .

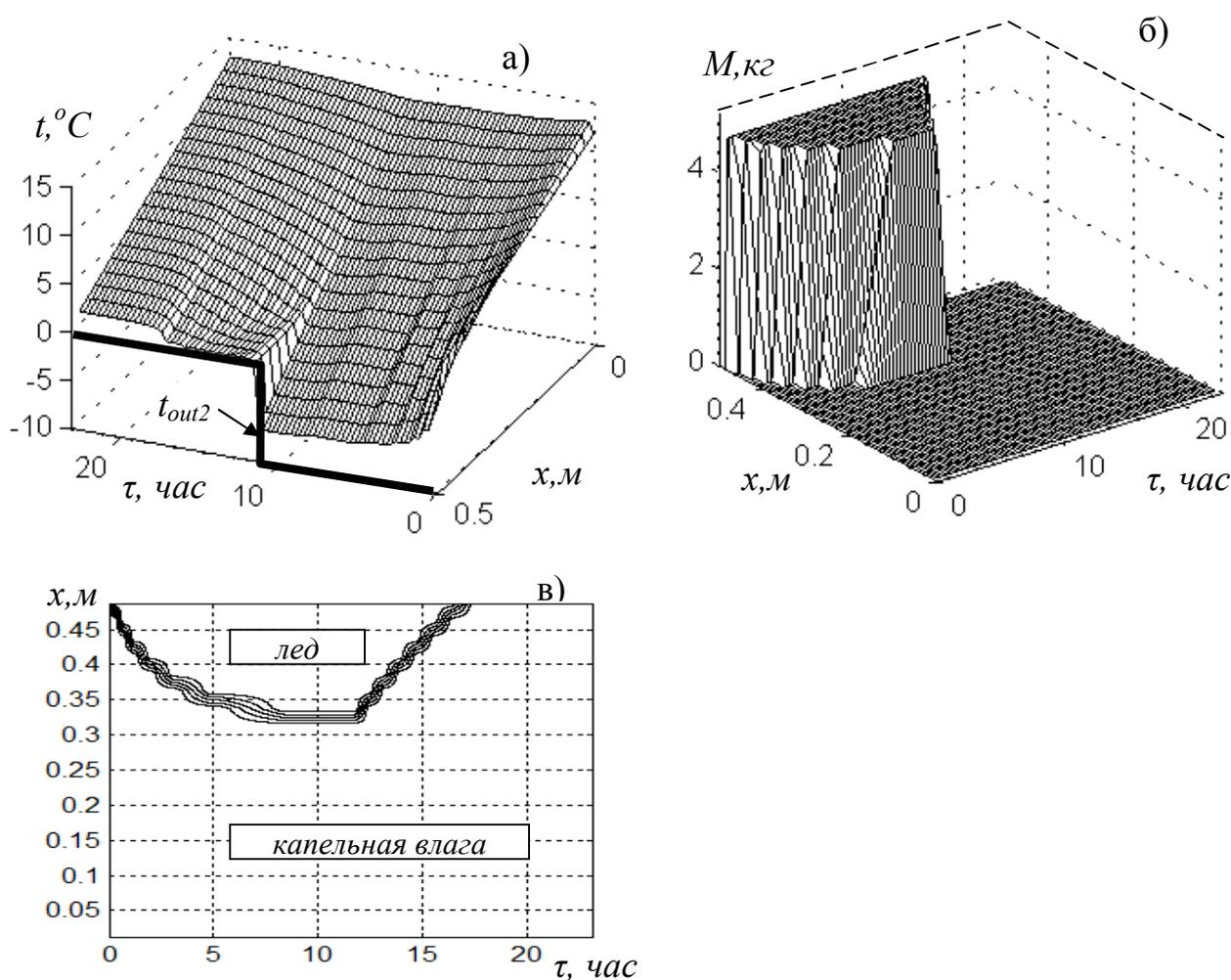


Рисунок 4 – Эволюция распределения температуры (а) и содержания замерзшей влаги (б – 3D график, в – контурный график) при скачкообразном изменении внешней температуры

Таким образом, разработанная ячеечная модель позволяет на основе простого и универсального вычислительного алгоритма рассчитывать процессы замерзания и оттаивания капельной влаги в ограждающих конструкциях зданий и прогнозировать продвижение фронта замерзания при изменении температуры окружающей среды по произвольному заданному закону. Она позволяет определять конструктивные и режимные условия, при которых фронт промерзания не проникает дальше установленного предела или вообще отсутствует, но решение этой задачи уже выходит за рамки настоящей статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) [Текст]: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982.
2. Berthiaux H. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology / H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // Powder Technology, 157 (2005). – 128-137.
3. Mizonov V. Application of the theory of Markov chains to model heat and mass transfer between stochastically moving particulate and gas flows / V. Mizonov, H. Berthiaux, P. Arlabosse, D. Djerroud // Granular Matter, 2008, Volume 10, Number 4 / June, pp. 335-340.
4. Федосов, С.В. Ячеечная модель нелинейной теплопередачи через многослойную стенку [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Р. Порошин, Н.Н. Елин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2011. – №6 (38). – С. 50-56.

#### **Сахаров Алексей Анатольевич**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры «Гидравлика, водоснабжение и водоотведение»  
Тел.: +7 (4932) 93-06-22  
E-mail: oz.ggp@mail.ru

#### **Федосов Сергей Викторович**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
Тел.: +7 (4932) 32-85-40  
E-mail: rektor@igas.ru

#### **Елин Николай Николаевич**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика, водоснабжение и водоотведение»  
Тел.: +7 (4932) 93-06-22  
E-mail: yelin54@mail.ru

#### **Мизонов Вадим Евгеньевич**

Ивановский государственный энергетический университет  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика»  
Тел.: +7 (4932) 32-69-00  
E-mail: mizonov@home.ivanovo.ru

---

A.A. SAHAROV, S.V. FEDOSOV, N.N. ELIN, V.E. MIZONOV

### **A CELL MODEL OF MOISTURE FREEZE-UP IN A PLANE HEAT CONDUCTING WALL**

*A cell non-linear mathematical model of heat transfer through a plane wall containing moisture undergoing the phase transformation “freeze-up – thaw” is proposed. The model is built on the basis of a universal computational algorithm that is based on the mathematical tool of Markov chains theory and allows calculating transient and steady-state heat processes in the wall taking into account freeze-up and thaw of moisture. Examples of calculation of frost penetration front at various external conditions are presented.*

*Keywords: plane wall, cell model, heat conduction, moisture freeze-up, frost penetration front.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Bogoslovskij, V.N. Stroitel'naja teplofizika (teplofizicheskie osnovy otoplenija, ventiljacii i kondicionirovani-ja vozduha) [Tekst]: ucheb. dlja vuzov. – 2-e izd., pererab. i dop. / V.N. Bogoslovskij. – M.: Vysshaja shkola, 1982.
2. Berthiaux H. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology / H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // Powder Technology, 157 (2005). – 128-137.
3. Mizonov V. Application of the theory of Markov chains to model heat and mass transfer between stochastically moving particulate and gas flows / V. Mizonov, H. Berthiaux, P. Arlabosse, D. Djerroud // Granular Matter, 2008, Volume 10, Number 4 / June, pp. 335-340.
4. Fedosov, S.V. Jachechnaja model' nelinejnoj teploperedachi cherez mnogosljnuju stenku [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Mizonov, N.R. Poroshin, N.N. Elin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №6 (38). – S. 50-56.

### **Fedosov Sergey Victorovich**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo  
Doctor of technical science, professor  
Ph.: +7 (4932) 32-85-40  
E-mail: rektor@igasu.ru

### **Sakharov Aleksei Anatol'evich**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo  
Post-graduate student of department «Hydraulics, water supply and water drain»  
Ph.: +7 (4932) 93-06-22  
E-mail: oz.ggp@mail.ru

### **Yelin Nicolay Nicolaevich**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo  
Doctor of technical science, professor, head of department «Hydraulics, water supply and water drain»  
Ph.: +7 (4932) 93-06-22  
E-mail: yelin54@mail.ru

### **Mizonov Vadim Evgenievich**

Ivanovo state power engineering university, Ivanovo  
Doctor of technical science, professor, head of department «Applied mathematics»  
Ph.: +7 (4932) 32-69-00  
E-mail: mizonov@home.ivanovo.ru

СОЛОМЕНЦЕВ А. Б., КУЛИКОВА А. В.

## УПЛОТНЯЕМОСТЬ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ДОБАВКАМИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Определены физико-механические и реологические свойства битума с добавками, разработана методика оценки уплотняемости щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС) по показателям средней плотности и водонасыщению асфальтобетона. Произведена оценка уплотняемости ЩМАС с различными добавками для теплого асфальтобетона при пониженных температурах.*

**Ключевые слова:** добавки для теплого асфальтобетона, реологические свойства битума, уплотняемость ЩМАС.

Теплый асфальтобетон начали широко применять во второй половине XX века как в СССР, так и других странах. Требования по технологии приготовления и укладке теплого асфальтобетона до сих пор входят в СНиП 3.06.03-85, а требования к показателям свойств входили в ГОСТ 9128-84. Наибольший вклад в изучение структуры и свойств теплого асфальтобетона в СССР внес профессор МАДИ Королев И.В., который всесторонне изучил структуру и свойства этого асфальтобетона и обосновал эффективность его применения [1]. Теплый асфальтобетон – это материал, полученный уплотнением при температуре 40-90°C, рассчитанной и приготовленной при температуре 90-130°C смеси щебня, песка, минерального порошка и полувязких битумов или жидкого битума СГ 130/200. Асфальтобетонные смеси по свойствам и технологии приготовления аналогичные теплomu асфальтобетону, применявшемуся в СССР, применялись также в ФРГ, ГДР, ЧССР, Англии, Канаде и других странах.

Полувязкий или жидкий битум для теплых смесей получали разжижением вязкого дорожного битума жидкими нефтяными продуктами. Теплomu асфальтобетону на жидких дорожных битумах для окончательного формирования структуры и стабилизации свойств требуется несколько недель для испарения легких фракций и доуплотнения транспортными средствами. Такой асфальтобетон обладает более низкой адгезионной и когезионной прочностью, а также водо- и морозостойкостью в начальный период [2]. Применение в теплом асфальтобетоне битумов с меньшей вязкостью определило способность смесей приобретать требуемую плотность в покрытии при более низких температурах самой смеси и более низких температурах воздуха по сравнению с горячими смесями, а также более высокую трещиностойкость теплого асфальтобетона по сравнению с горячим.

В начале XXI века начали разрабатываться технологии и добавки, которые позволяют снизить температуру приготовления и уплотнения горячей асфальтобетонной смеси и не снижать показатели качества покрытия. При этом по сравнению с горячими смесями без добавок возможно достижение следующих преимуществ:

- снижение энергозатрат на 15-30% при приготовлении асфальтобетонной смеси на вязком битуме за счет снижения температуры;
- замедление остывания смеси при транспортировке (теплые смеси остывают медленнее горячих) и обусловленное этим увеличение дальности возки;
- уменьшение выброса вредных веществ в атмосферу (углекислого газа – на 30%, дыма и пылевидных отходов – на 50-60%), уменьшение неприятного запаха при укладке асфальтобетона и температуры в зоне производства работ, что существенно в городских условиях;
- продление строительного сезона за счет улучшения удобообрабатываемости смеси и возможности ее уплотнения при пониженных температурах воздуха;
- уменьшение термоокислительного старения битума вследствие снижения температур приготовления и укладки смеси, что повышает сопротивление асфальтобетона усталости и появлению трещин при охлаждении.

Для оценки эффективности были взяты четыре добавки для снижения температуры уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, представленные на российском рынке, а именно: Ворммикс Л (Италия), Секабаз РТ 945 (Франция), Evotherm J1 (США), Aspha-min (Германия). Показатели свойств добавок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели свойств добавок для теплого асфальтобетона

№ п/п	Наименование показателей добавок	Показатели свойств добавок			
		Ворммикс Л (Италия)	Секабаз РТ 945 (Франция)	Evotherm J1 (США)	Aspha-min (Германия)
1	Состав	Основана на амидах	Состав на основе полимеров; имидазолина больше 25 %	Продукт реакции конденсации полимеров жирных кислот и таллового масла – 75-95%; Модифицированный продукт реакции конденсации полиаминов жирных кислот таллового масла – 5-25%; 2,2'-иминоэтанол	Гидратированный алюмосиликат с содержанием воды в кристаллической решетке до 25%
2	Внешний вид, цвет	Вязкая жидкость темного цвета	При 25°C светло-желтая жидкость	Жидкость янтарного, темного цвета	Порошок белого цвета фракций 0-0,9 мм, 0-2,0 мм
3	рН	Основной	Щелочность по перхлору 4,2-5,2	10-12 щелочь	–
4	Точка застывания	Меньше 5°C	Около минус 10°C	–	–
5	Точка воспламенения	Точка вспышки – больше 150°C	Более 100°C	Температура вспышки 143°C	Негорюч
6	Плотность при t, °C	0,946 кг/л при 15°C	Около 1,0 кг/м <sup>3</sup> при 25°C	0,99	–
7	Растворимость: в воде в других растворах	–	Нерастворим в ароматических соединениях и спиртах	Полная –	Нерастворим
8	Вязкость при t, °C	При 50°C менее 1,000 сПз	≤ 700 мПа·с	30°C – 500 сПз 25°C – 1000 сПз 10°C – 3500 сПз	–
9	Температура кипения, °C	–	–	Более 200°C	Негорюч

Примечание: сведения о добавках взяты из информационных материалов о добавках, представленных фирмами, продающими добавки в России.

Итальянская добавка Ворммикс Л представляет собой вязкую жидкость темного цвета, основана на амидах, рН носит основной характер, точка застывания меньше 5°C. Французская добавка Секабаз РТ 945 – светло-желтая жидкость при 25°C, точка застывания около минус 10°C; состав добавки на основе полимеров, имидазолина больше 25%, щелочность по перхлору 4,2-5,2. Американская добавка Evotherm J1 состоит в основном из продукта реакции конденсации полиаминов жирных кислот и таллового масла – 75-95%, из модифицированного продукта этой реакции – 5-25%, а также содержит 2,2'-иминоэтанол – 2-4%. Добавка представляет собой жидкость янтарного, темного цвета, рН – 10-12, растворима в воде. Немецкая добавка Aspha-min представляет собой порошок белого цвета фракций 0-0,9 мм или 0-2,0 мм, который является гидратированным алюмосиликатом с содержанием воды в кристаллической решетке до 25%.

Показатели свойств битума БНД 60/90 Московского НПЗ без добавок, а также с добавками для снижения температуры уплотнения горячего асфальтобетона приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели свойств битума с добавками для теплого асфальтобетона

№ п/п	Наименование и количество добавки, вводимой в битум	Показатели свойств				
		Пенетрация, 0,1 мм		Температура размягчения по КиШ, °С	Температура хрупкости, °С	Сцепление с гранитным материалом фракции 2-5 мм
		При 25°С	При 0°С			
1	Битум БНД 60/90 без добавок	73	29	52	-22	Образец №3
2	Секабаз РТ 945 1% от массы битума	52	28	48,5	-14	Образец №2
3	2% от массы битума	54	23	49,5	-13	Образец №2
4	Aspha-min 5% от массы битума	35	19,5	50	-	Образец №3
5	10% от массы битума	29	15	64,5	-	Образец №3
6	Ворммикс Л 1% от массы битума	58	16	48	-13	Образец №3
7	2% от массы битума	59	20	47	-15	Образец №3
8	Evotherm J1 1% от массы битума	56	25	47,5	-13	Образец №2
9	2% от массы битума	55	16	46	-13	Образец №1

Для жидких добавок расход в битуме составлял 1 и 2% от массы битума, а для порошковой добавки Aspha-min расход в битуме составлял 0,3 и 0,6% от массы смеси или 5 и 10% от массы битума. Как видно из таблицы 2, глубина проникания иглы (пенетрация), характеризующая вязкость битума, с введением добавок снижается, т.е. вязкость битума с добавками возрастает. Для битума с добавкой Секабаз РТ 945 при 25°С пенетрация снижается на 27%, а при 0°С – на 21%; для битума с добавкой Aspha-min при 25°С пенетрация снижается на 60%, а при 0°С – на 48%; для битума с добавкой Ворммикс Л при 25°С пенетрация снижается на 20%, а при 0°С на 31%; для битума с добавкой Evotherm J1 пенетрация снижается на 24% при 25°С, а при 0°С на 45%. Температура размягчения битума с жидкими добавками, которая характеризует теплоустойчивость битума, снижается для битума с Секабаз РТ 945 на 5,8%, с Ворммикс Л на – 8,7%, с Evotherm J1 на – 9,6%, а для битума с 10% порошковой добавки Aspha-min увеличивается на 24%. Температура хрупкости битума с жидкими добавками уменьшается, т.е. он переходит в хрупкое состояние при более высокой температуре. Для битума с добавкой Секабаз РТ 945 температура хрупкости повышается, т.е. ухудшается на 38,6%, с добавкой Ворммикс Л – на 36,3%, а с добавкой Evotherm J1 на 41%. Адгезионные свойства битума характеризуются его сцеплением с гранитным материалом фракции 2-5 мм после 30 минут кипячения смеси материала с битумом в дистиллированной воде. Для битума без добавок и с добавками Aspha-min и Ворммикс Л сцепление характеризует образец №3, т.е. сцепление неудовлетворительное, менее 3/4 материала покрыто битумом после кипячения. Для битума с добавкой Секабаз РТ 945 сцепление характеризуется образцом №2, т.е. сцепление хорошее, более 3/4 поверхности материала покрыто битумом после кипячения, для битума с 2% добавки Evotherm J1 достигается практически полное покрытие поверхности материала после кипячения, т.е. сцепление соответствует образцу №1.

Динамическую вязкость добавок, битума и битума с добавками определяли на ротационном вискозиметре Брукфилда RVDV-II+PRO. Значения динамической вязкости при различных температурах приведены в таблице 3.

Динамическая вязкость добавок определялась в диапазоне температур 40-100°С. Добавки Ворммикс Л и Секабаз РТ 945 при 100°С имеют вязкость около 26 сПз. С уменьшением температуры вязкость увеличивается и достигает при 40°С значения 469 сРз для добавки Ворммикс Л и значения 300 сРз для добавки Секабаз РТ 945. Добавка Evotherm J1 менее вязкая: вязкость при 80°С составляет 26 сРз, а при 40°С – 218 сРз.

Вязкость битума с уменьшением температуры существенно возрастает. При 160°С она составляет 158 сРз, при 60°С – 466000 сПз, а при 50°С – 2 430 000 сПз. При введении в битум 2% добавок от его массы вязкость снижается. При температуре приготовления щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси 160°С введение добавки Ворммикс Л снижает вязкость на 14,5%, Секабаз РТ 945 – на 11%, Evotherm J1 – на 17,7%. При температуре уплотнения смеси 110°С введение добавки Ворммикс Л снижает вязкость на 21,3%, Секабаз РТ 945 – на 16%, Evotherm J1 – на 25%.

Таблица 3 – Показатели динамической вязкости добавок, битума и битума с добавками

№ п/п	Вид материала	Вязкость материала, сРз, при заданной температуре, °С											
		160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50
1	Ворммикс Л	–	–	–	–	–	–	26,5	37,0	55,8	86,5	142,0	251,0
2	Секабаз РТ 945	–	–	–	–	–	–	26,1	35,3	49,4	72,0	109,0	173,0
3	Evotherm J1	–	–	–	–	–	–	–	–	26,0	40,0	66,0	118,5
4	Битум БНД 60/90	158	240	380	645	1160	2320	5000	12200	33800	117000	466000	2430000
5	Битум БНД 60/90+Ворммикс 2% от массы битума	135	202	313	525	913	1917	3625	9440	22650	81500	325000	1620000
6	Битум БНД 60/90 Секабаз РТ 945 2% от массы битума	141	208	331	546	991	1945	4250	10400	32200	108000	530000	–
7	Битум БНД 60/90+ Evotherm J1 2% от массы битума	130	194	306	510	910	1742	3780	10000	27800	90000	360000	1710000

При пониженных температурах уплотнения добавки действуют по-разному. Наиболее существенно снижает вязкость добавка Ворммикс Л: при 80°С на 33%; при 60°С – на 30%. Добавка Evotherm J1 снижает вязкость при 80°С на 17,8%, а при 60°С – на 22,7%. Наименее эффективна добавка Секабаз РТ 945: при 80°С вязкость снижается на 4,7%, а при 60°С вязкость повышается по сравнению с вязкостью битума без добавок на 12%.

Для оценки влияния добавок на уплотняемость щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМАС) использовалась смесь крупностью до 15 мм, соответствующая ГОСТ 31015-2002. Состав смеси: щебень гранитный фракции 10-15 мм – 43%, щебень гранитный фракции 5-10 мм – 30%, отсев гранитный фракции 0-5 мм – 14%, минеральный порошок – 13%, стабилизирующая добавка СД-3 – 0,3% от массы минеральной части, стабилизирующая добавка РТЭП – 0,3% от массы минеральной части, битум БНД 60/90 – 6,0% от массы минеральной части смеси. Приготовление ЩМАС-15 в лабораторных условиях производилось в лабораторном подогреваемом смесителе емкостью 10 л. Подогретые до температуры 160°С песок и щебень вводились в смеситель и перемешивались 30 секунд, затем вводился минеральный порошок и материалы перемешивались еще 30 секунд, затем вводились гранулированные добавки СД-3 и РТЭП и перемешивались 1,5 минуты, затем вводился битум с температурой 140°С и перемешивание продолжалось еще 2,5 минуты. Таким образом, общее время перемешивания составляло 5 минут. Жидкие добавки для теплого асфальтобетона вводились предварительно в разогретый битум, а порошковая добавка вводилась одновременно с минеральным порошком. Температура ЩМАС-15 при перемешивании составляла 140-145°С. Готовая смесь выгружалась из лабораторного смесителя и использовалась для изготовления асфальтобетонных образцов диаметром 71,4 мм по ГОСТ 12801-98.

Предварительное формование асфальтобетонных образцов диаметром 71,4 мм из ЩМАС-15 без добавок для теплого асфальтобетона проводилось при нагрузке на образец 16 тонн в течение 3 минут. Температура ЩМАС-15 в ходе предварительного формования принималась равной 160°С, т.к. щебеночно-мастичную асфальтобетонную смесь следует уплотнять сразу после укладки при максимально высокой температуре без использования вибрации. Поэтому при уплотнении асфальтобетонных образцов вибрация не использовалась. Средняя плотность пяти полученных образцов составила  $\rho_m=2,40$  г/см<sup>3</sup>, водонасыщение  $W=2,45\%$ , предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов при 20°С составил  $R_{вод}^{20}=3,65$  МПа. Далее определили минимальную нагрузку на образец при формовании, при которой достигается плотность, полученная в ходе предварительного формования, т.е. 2,40 г/см<sup>3</sup>. Значения показателей свойств асфальтобетонных образцов при различном значении нагрузки на образец приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели свойств асфальтобетонных образцов при различном значении нагрузки на образец при формовании

Показатели	Значение показателей при нагрузке, т				
	16	14	12	10	8
Средняя плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,40	2,40	2,40	2,40	2,39
Водонасыщение $W$ , % по объему	2,11	1,85	1,67	1,83	2,19
Предел прочности при сжатии $R_{вод}^{20}$ , МПа	3,75	3,64	3,48	3,47	3,05

Как видно из таблицы, снижение средней плотности отформованных образцов начинается при снижении нагрузки на образец до 8 тонн, т.е. вдвое меньше первоначальной. При этом показатели водонасыщения и прочности при сжатии примерно одинаковые. Поэтому при дальнейшем изготовлении образцов усилие формования  $P$  составляло 10 тонн. Для предварительной оценки влияния температуры уплотнения на показатели свойств асфальтобетонных образцов уплотнение образцов ЩМАС-15 провели при 140, 120, 100, 80 и 60°C (табл. 5).

Таблица 5 – Показатели свойств асфальтобетонных образцов ЩМА-15 при усилии формования  $P=10$  тонн при разной температуре формования

Показатели	Значение показателей при температуре, °С				
	140	120	100	80	60
Средняя плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	2,39	2,37	2,37	2,37	2,37
Водонасыщение $W$ , % по объему	2,3	3,15	2,91	3,04	2,89
Предел прочности при сжатии $R_{\text{вод}}^{20}$ , МПа	2,97	2,7	2,98	2,74	2,87

Оказалось, что средняя плотность образцов при температуре формования ниже 120°C составляет 2,37 г/см<sup>3</sup>, водонасыщение при этом снизилось незначительно, а значения предела прочности при сжатии не изменились. Для оценки влияния времени уплотнения образцов на их свойства и ужесточения условий уплотнения время уплотнения было уменьшено до 1,5 минут. Формование образцов проводилось также с усилием  $P=10$  тонн и при температурах от 140°C до 60°C. Оказалось, что за 1,5 минуты образцы успевают уплотниться также, как и за 3 минуты, а показатели водонасыщения и прочности не меняются. Поэтому при дальнейшем изготовлении образцов время уплотнения составляло 1,5 минуты.

Для оценки эффективности добавок для теплого асфальтобетона, основываясь на результатах предварительного формования, были выбраны следующие параметры уплотнения или формования в лабораторных условиях: нагрузка на образец  $P=10$  тонн, время формования – 1,5 минуты, начальная температура ЩМАС-15 при формовании – 80°C и 60°C. При выбранных параметрах были отформованы и испытаны образцы ЩМАС-15 с четырьмя добавками для теплого асфальтобетона, а также для сравнения с адгезионной добавкой Амдор-10 и без добавок. Показатели свойств асфальтобетонных образцов при температуре формования 80°C приведены в таблице 6, а при температуре 60°C – в таблице 7.

Таблица 6 – Показатели свойств асфальтобетонных образцов ЩМА-15 при температуре формования 80°C

№ п/п	Наименование добавок и их расход в % от массы битума	Значение показателей свойств асфальтобетонных образцов		
		Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Водонасыщение, % по объему	Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии при 20°C, МПа
1	Амдор-10: 1%	2,37	2,76	2,44
2	2%	2,37	2,62	2,26
3	Ворммикс Л: 1%	2,38	1,93	2,10
4	2%	2,39	2,87	1,99
5	Секабаз РТ 945: 1%	2,38	2,45	2,35
6	2%	2,40	2,97	2,29
7	Aspha-min: 5%	2,37	3,11	2,65
8	10%	2,34	3,37	2,83
9	Evotherm J1: 1%	2,39	2,59	3,05
10	2%	2,38	2,48	3,07
11	Без добавок	2,37	3,04	2,74

Как видно из таблицы 6, введение в смесь добавки Амдор-10 не улучшает уплотняемость ЦМАС-15 при температуре 80°C. Введение добавок Ворммикс Л или Evotherm J1 улучшает уплотняемость на 0,01 г/см<sup>3</sup>, введение Секабаз РТ 945 позволяет получить среднюю плотность как у образцов при уплотнении при высокой температуре 160°C, т.е. 2,40 г/см<sup>3</sup>; а введение добавки Aspha-min при 5% в смеси не изменяет среднюю плотность образцов, а при 10% в смеси, наоборот, снижает ее на 0,03 г/см<sup>3</sup>.

Как видно из таблицы 7, введение в смесь добавки Амдор-10 не улучшает уплотняемость ЦМАС-15 и при температуре 60°C. Введение добавки Ворммикс Л повышает среднюю плотность образцов на 0,01 г/см<sup>3</sup>, введение добавок Секабаз РТ 945 и Evotherm J1 повышает на 0,02 г/см<sup>3</sup>, а введение порошка Aspha-min снижает среднюю плотность на 0,06 г/см<sup>3</sup> при расходе 10% от массы битума.

Таблица 7 – Показатели свойств асфальтобетонных образцов ЦМА-15 при температуре формования 60°C

№ п/п	Наименование добавок и их расход в % от массы битума	Значение показателей свойств асфальтобетонных образцов		
		Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Водонасыщение, % по объему	Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии при 20°C, МПа
1	Амдор-10: 1%	2,37	2,92	1,83
2	2%	2,37	3,36	2,26
3	Ворммикс Л: 1%	2,38	2,90	2,01
4	2%	2,38	2,80	1,89
5	Секабаз РТ 945: 1%	2,38	3,37	2,34
6	2%	2,39	2,69	2,38
7	Aspha-min: 5%	2,37	3,08	2,59
8	10%	2,31	3,59	2,29
9	Evotherm J1: 1%	2,38	3,13	2,82
10	2%	2,39	3,58	3,04
11	Без добавок	2,37	2,89	2,87

Таким образом, основываясь на вышеприведенных данных для дальнейших исследований, следует рекомендовать добавки Ворммикс Л, Секабаз РТ 945 и Evotherm J1.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев, И.В. Дорожный теплый асфальтобетон [Текст] / И.В. Королев, Е.Н. Асеева, В.А. Головки, Г.Р. Фоменко. – Киев: Вища школа. Головное издательство. – 1984. – 200 с.
2. Грушко, И.М. Дорожно-строительные материалы: Учебник для вузов [Текст] / И.М. Грушко, И.В. Королев, И.М. Борщ, Г.М. Мищенко. – М.: Транспорт. – 1991. – 357 с.

**Соломенцев Александр Борисович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Куликова Анастасия Владимировна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Студент  
Тел.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: AnastKulikova@mail.ru

A.B. SOLOMENTSEV, A.V. KULIKOVA

## COMPACTIBILITY OF STONE MASTIC ASPHALT MIXES WITH ADDITIVES AT THE LOWERED TEMPERATURES

*Physicomechanical and rheological properties of bitumen with additives are defined, the technique of an assessment of compactibility of stone mastic asphalt (SMA) mixes on indicators of average density and asphalt concrete water saturation is developed. The assessment of compactibility of SMA mixes with various additives is made for warm asphalt concrete at the lowered temperatures.*

**Keywords:** additives for warm asphalt, rheological properties of bitumen, compactibility of SMA mixes.

### BIBLIOGRAPHY

1. Korolev, I.V. Dorozhnyj teplyj asfal'tobeton [Tekst] / I.V. Korolev, E.N. Aseeva, V.A. Golovko, G.R. Fomenko. – Kiev: Vishha shkola. Golovnoe izdatel'stvo. – 1984. – 200 s.
2. Grushko, I.M. Dorozhno-stroitel'nye materialy: Uchebnik dlja vuzov [Tekst] / I.M. Grushko, I.V. Korolev, I.M. Borshh, G.M. Mishhenko. – M.: Transport. – 1991. – 357 s.

#### **Solomentsev Alexandr Borisovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department «Building of highways»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: oantc@ostu.ru

#### **Kulikova Anastasia Vladimirovna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Student  
Ph.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: AnastKulikova@mail.ru

ФЕДОСОВ С.В., ЩЕПОЧКИНА Ю.А., БАКАНОВ М.О.

## КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ПЕНОСТЕКЛА С ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Показана целесообразность введения в пеностекляную шихту плавня. Предложена технология получения композиционного материала при одновременном вспенивании пеностекляной шихты и ее спекании с отделочным стекловидным слоем. Показана возможность оптимизации состава шихты для получения пеностекла с защитно-декоративным покрытием с добавлением указанного плавня. Представлены некоторые результаты исследования образцов полученного материала. Процессы, протекающие при формировании оплаваемого покрытия, находятся в тесной связи с его вязкостью. Высокая вязкость замедляет выделение газовых пузырей, ухудшает растекаемость расплава на поверхности подложки. Чрезмерно низкая вязкость при обжиге может привести к стеканию расплава, к образованию наплывов, т.е. к неравномерной толщине покрытия.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, пеностекло, плавень, защитно-декоративное покрытие.

Сравнительный анализ современных теплоизоляционных материалов показал, что к числу наиболее эффективных относится пеностекло [1]. Его отличает от всех используемых материалов низкая теплопроводность, высокая прочность при малой плотности, химическая и биологическая устойчивость, экологическая безопасность, что дает основание полагать – пеностекло является конкурентоспособным материалом. Однако отделочные блоки из пеностекла, используемые для теплоизоляции по лицевой поверхности зданий, требуют нанесения декоративных штукатурок или иных отделочных покрытий. В настоящее время актуален вопрос производства пеностекла с последующим нанесением на него защитно-декоративных стекловидных покрытий [1-3]. При этом появляется возможность значительно снизить затраты на монтаж фасадных систем, повысить физико-механические показатели пеностекла и его эстетические свойства.

Нами поставлена задача получения композиционного материала на основе пеностекла при одновременном вспенивании пеностекляной шихты и спекании с отделочным стекловидным слоем, что позволяет упростить технологию производства данного материала с защитно-декоративным покрытием за счет исключения отдельной стадии – оплавления стекловидного слоя.

Применение наиболее доступных и относительно дешевых материалов в качестве сырьевых, а также сокращение количества технологических циклов при производстве пеностекла поможет в значительной степени сократить энергозатраты и, как следствие, стоимость единицы продукции. Ввиду этого использование тарного и листового стекла в качестве сырьевых материалов для производства пеностекла с защитно-декоративным покрытием является приемлемым.

Для получения пеностекла с защитно-декоративным покрытием по лицевой поверхности использовали бой тарного и листового стекла. Оптимальным температурным интервалом для вспенивания шихты и спекания со стекловидным слоем является 935-955°C. При данной температуре вязкость стекла оптимальна для того, чтобы давление газовой фазы обеспечило стабильную пористость материала, тем самым обеспечив стекловидному слою качественное сцепление.

Предложено добавлять в пеностекляную шихту плавень, для снижения вязкости расплава, что в свою очередь положительно влияет на порообразование в стекломассе, и, как следствие, на теплоизоляционные свойства пористого материала. Плавень вводили посредством добавления в шихту натрия двууглекислого, содержание которого в шихте варьировалось (масс. %): 2%, 3%, 5% и 7%. Использовали следующие составы шихты, содержащей, мас. %: стеклобой (94,0; 93,0; 91,0; 89,0), газообразователь 4,0, сода (2,0; 3,0; 5,0, 7,0) (табл. 1). Шихту помещали в стальные формы, заполняя их на 50% объема, сверху укладывали слой толщиной 10-20% от объема пеностекляной шихты, измельченного до прохождения через сетку 0063 стеклобоя. Формы с шихтой и стекловидным слоем переносили в разогретую до 300°C электрическую муфельную печь для

вспенивания. В камере печи формы устанавливали в зоне постоянных температур. Вспенивание проводили при температуре 950°C в течение 40 мин. (табл. 2). Отжиг блоков пеностекла происходил при самопроизвольном охлаждении муфельной печи в течение 2 часов. После извлечения блоков из форм им придавали заданные размеры (40×40×40 мм) путем обрезки граней.

Таблица 1 – Составы шихты для получения композиционного материала на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием

Компоненты	Состав шихты, масс. %			
Бой листового стекла	94	93	91	89
Сода	2	3	5	7
Мел	4	4	4	4

Таблица 2 – Физико-механические показатели полученных образцов композиционного материала на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием при добавлении в шихту Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> разной концентрации % по массе

№ п/п	Состав покрытия	Состав шихты	Газообразователь, мас %	Сода, мас %	t <sub>всп</sub> , °C	Время всп., мин	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	В, %	П, %
1	бой тарного стекла	бой листового стекла	CaCO <sub>3</sub> (мел), 4	2	950	40	1867	7,2	28
2	бой тарного стекла	бой листового стекла	CaCO <sub>3</sub> (мел), 4	3	950	40	1608	2,7	38
3	бой тарного стекла	бой листового стекла	CaCO <sub>3</sub> (мел), 4	5	950	40	1647	5,7	37
4	бой тарного стекла	бой листового стекла	CaCO <sub>3</sub> (мел), 4	7	950	40	1837	3,9	29

Так как и покрытие, и материал подложки (пеностекло) являются близкими по составу (бой тарного и листового стекла), то при термической обработке материала повышается прочность сцепления покрытия с подложкой.

Процессы, протекающие при формировании покрытия, находятся в тесной связи с его вязкостью (изменение вязкости от 18 до 45 Пз) [4]. Высокая вязкость замедляет выделение газовых пузырей, ухудшает растекаемость расплава на поверхности подложки. Чрезмерно низкая вязкость при обжиге может привести к стеканию расплава, к образованию наплывов, т.е. к неравномерной толщине покрытия.

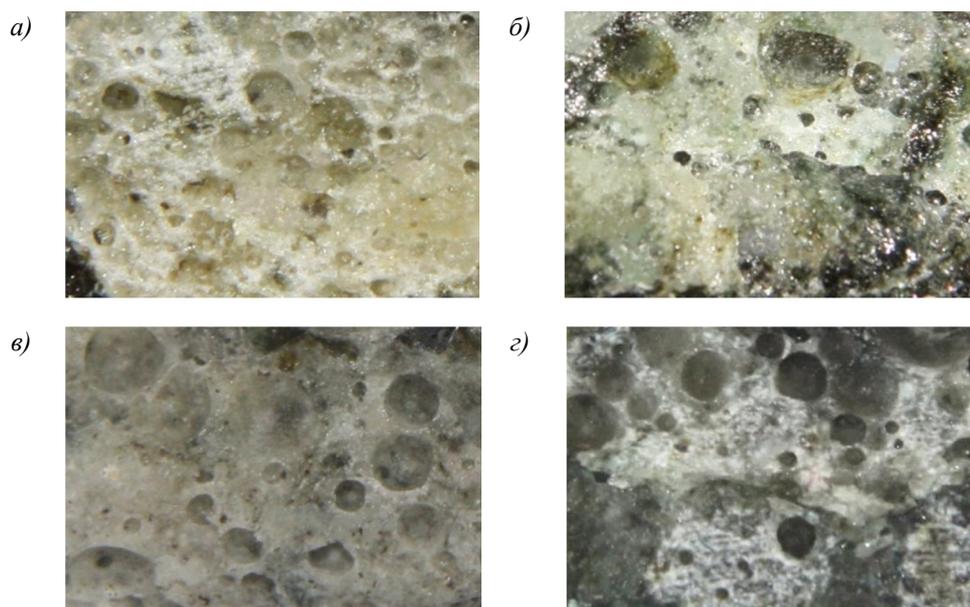
Поверхностное натяжение имеет тоже немаловажное значение при спекании стекло-видного слоя и пеностекла: с понижением поверхностного натяжения покрытий наблюдается лучшее смачивание поверхности подложки, повышается адгезия расплава к пеностеклу, а, следовательно, повышается прочность сцепления, значительно облегчается заплывание полостей пористой поверхности.

Добавление в шихту соды (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) при температуре спекания 950°C позволяет оптимизировать поверхностное натяжение и вязкость, что в свою очередь позволяет образующейся газовой фазе вспенить пеностекло и пройти излишкам через расплавленный декоративный слой.

При концентрации соды 2% и 3% по массе структура композиционного материала достаточно неоднородная (рис. 2), что дает основание полагать, что данная концентрация соды в шихте недостаточна для приемлемой пористой структуры материала. Данные концентрации слишком малы, на процесс формирования пор влияют не значительно.

В образце при концентрации соды в шихте 7% присутствуют частично замкнутые поры, но вязкость расплава была достаточно низкая для того, чтобы газовая фаза образовала поры,

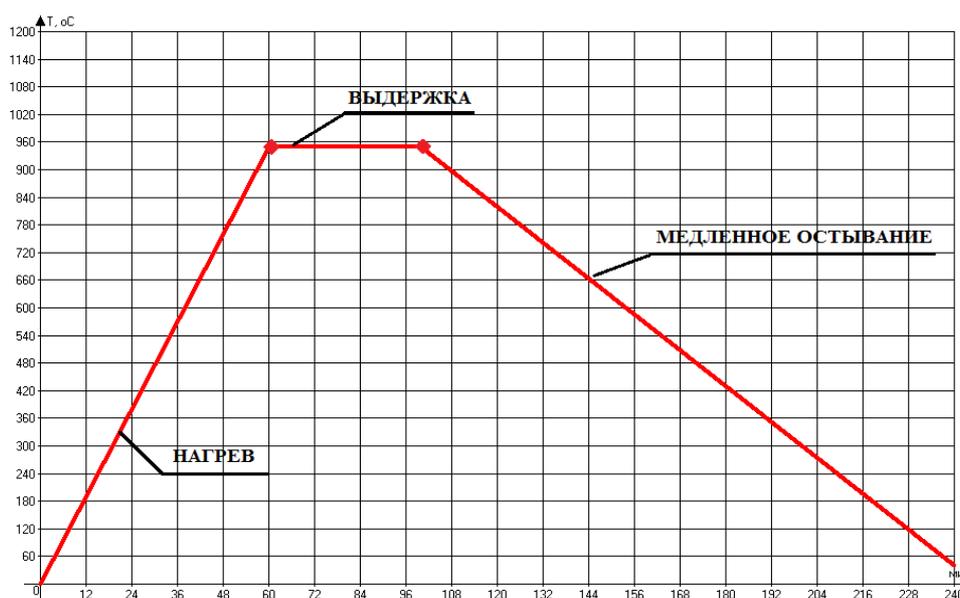
часть газов выходила наружу, в камеру печи, частичная неоднородная поризация показывает это. Низкая вязкость расплава не позволяла газам задержаться в расплаве и образовать поры.



**Рисунок 2 – Микроструктура полученных образцов композиционного материала на основе пеностекла при увеличении в 40 раз, полученных из шихты, содержащей:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : а – 2% мас.; б – 3% мас.; в – 5% мас.; г – 7% масс.**

Из представленных результатов исследований следует полагать, что для создания оптимального соотношения вязкости и поверхностного натяжения расплава пеностекла и стекловидного слоя, обеспечения хорошей пористой структуры и равномерного распределения пор по образцу при температуре спекания  $950^\circ\text{C}$  необходимая концентрация соды в шихте должна быть 5% по массе.

Главную роль в формировании теплоизоляционного стеклокомпозита играют процессы диффузии между покрытием и подложкой, т.е. при оптимальных режимах термообработки прочность контактного взаимодействия в системе «покрытие-пеностекло» определяется диффузией расплава в поверхностный слой подложки с частичной кристаллизацией стеклофазы.



**Рисунок 3 – График термической обработки образцов композиционного материала на основе пеностекла при  $950^\circ\text{C}$  время выдержки 40 мин.**

Показана целесообразность добавления в пеностекляную шихту  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  по нескольким причинам: во-первых, при температуре вспенивания стекломассы  $950^\circ\text{C}$  и временном интервале выдержки в течение 40 минут (рис. 3) достигается необходимая вязкость расплава, при которой газовая фаза образует частично замкнутые поры, равномерно распределенные по материалу; во-вторых, позволяет оптимизировать поверхностное натяжение, что в свою очередь позволяет образующейся газовой фазе вспенить пеностекло и пройти излишкам через расплавленный декоративный слой без его повреждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные разработки ГП «НИИСМ» [Текст]. – Минск: НПО «Стринко», 1999. – 60 с.
2. Щепочкина, Ю.А. Технология получения композиционного теплоизоляционного материала с защитно-декоративным покрытием [Текст] / Ю.А. Щепочкина, М.О. Баканов // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. - №3 (41). – С. 73-77.
3. Пучка, О.В. Новый композиционный теплоизоляционный материал на основе пеностекла с покрытием на лицевой поверхности / О.В. Пучка, А.А. Кузьменко, М.Н. Степанова // Известия вузов. Строительство. – 2007. – С. 53-55.
4. Проскуряков, А.Н. Измерение вязкости расплавов стекол с помощью вибрационного вискозиметра [Текст] / А.Н. Проскуряков, М.Б. Ремизов, С.А. Дубков // Полярное сияние 2005. Ядерное будущее: безопасность, экономика и право: сборник тезисов докладов VIII Международной молодежной научной конференции. – СПб., 2005.

#### **Федосов Сергей Викторович**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
Тел.: +7 (4932) 32-85-40  
E-mail: rektor@igasu.ru

#### **Щепочкина Юлия Алексеевна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
Тел.: +7 (4932) 32-89-42

#### **Баканов Максим Олегович**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
E-mail: mask-13@mail.ru

---

S.V. FEDOSOV, Ju.A. SHCHEPOCHKINA, M.O. BACANOV

### **COMPOSITE MATERIAL WITH THE PROTECTIVELY-DECORATIVE COVERING**

*Expediency of introduction in charge of a foamglass of fluxing agen is shown. The technology of receiving a composite material is offered at simultaneous foaming of charge of a foamglass and its agglomeration with a finishing steklovidny layer. Possibility of optimization of structure of charge for receiving a foamglass with a protective and decorative covering with addition of specified fluxing agen is shown. Some results of research of samples of the received material are presented. Processes occurring during the formation of fused coatings are closely related to its viscosity. High viscosity slows down allocation of gas bubbles, worsens melt rastekayemost on a substrate surface. Excessively low viscosity when roasting can lead to melt running off, to formation of flows, to non-uniform thickness of a covering.*

**Keywords:** composite material, foamglass, flux, protective decorative covering.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Osnovnye razrabotki GP «NIISM» [Tekst]. – Minsk: NPOOO «Strinko», 1999. – 60 s.
2. Shhepochkina, Ju.A. Tehnologija poluchenija kompozicionnogo teploizoljacionnogo materiala s zashhitno-dekorativnym pokrytiem [Tekst] / Ju.A. Shhepochkina, M.O. Bakanov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №3 (41) – S. 73-77.
3. Puchka, O.V. Novyj kompozicionnyj teploizoljacionnyj material na osnove penostekla s pokrytiem na licevoj poverhnosti / O.V. Puchka, A.A. Kuz'menko, M.N. Stepanova // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 2007. – S. 53-55.
4. Proskurjakov, A.N. Izmerenie vjazkosti rasplavov stekol s pomoshh'ju vibracionnogo viskozimetra [Tekst] / A.N. Proskurjakov, M.B. Remizov, S.A. Dubkov // Poljarnoe sijanie 2005. Jadernoe budushhee: bezopasnost', jekonomika i pravo: sbornik tezisov dokladov VIII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii. – SPb., 2005.

**Fedosov Sergey Victorovich**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Doctor of technical science, professor, head of department «Building materials technology and special technologies»

Ph.: +7 (4932) 32-85-40

E-mail: rektor@igas.ru

**Shhepochkina Julia Alekseevna**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Doctor of technical science, professor of department «Building materials technology and special technologies»

Ph.: +7 (4932) 32-89-42

**Bacanov Maksim Olegovich**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Post-graduate student of department «Building materials technology and special technologies»

E-mail: mask-13@mail.ru

ЯНЧЕНКО В.С., ЛУКУТЦОВА Н.П., КОРОЛЕВА Е.Л.,  
ВЫПОВА А.С.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ГИБРИДНОГО АВТОМАТА ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Рассмотрены основные методические подходы, применяемые при математическом моделировании на компьютере технологических процессов производства строительных материалов. При этом используется формализм гибридного автомата как наиболее эффективный для моделирования сложных систем. Описывается модель производства железобетонных изделий агрегатно-поточным способом, разработанная в среде Model Vision Studium (MvS).*

**Ключевые слова:** математическая модель, технологический процесс, железобетонные изделия, гибридный автомат, циклограмма процесса.

В настоящее время в условиях жесткой конкуренции на рынке строительных материалов и изделий и периодических кризисов спроса особенно остро ставится вопрос динамичности производства, быстрого перехода на новые типоразмеры и марки выпускаемой продукции. При этом требуется резкое сокращение сроков технологической подготовки производства. Одним из решений этой проблемы является применение математического компьютерного моделирования при проектировании технологических процессов и подборе требуемого технологического оборудования.

Использование современных высокоинтеллектуальных компьютерных систем проектирования и моделирования позволяет решать следующие задачи:

- в математическом, желателен с применением компьютерных визуальных образов, виде представлять технологическую структуру процесса, содержание и последовательность выполнения операций;
- рассчитывать режимы и основные технические параметры технологических операций в соответствии с выбранными машинами, устройствами и приспособлениями; позволять в процессе моделирования изменять состав и характеристики оборудования;
- производить расчеты пооперационной трудоемкости для проведения технико-экономического сравнения рассматриваемых вариантов выбранной технологии и оборудования;
- разрабатывать электронный пооперационный график процесса на основе расчета ритма технологической линии и длительности элементарных циклов, моделировать синхронность работы оборудования и выявлять непроизводительные его простои;
- моделировать развитие технологического процесса в пространстве и во времени, определяя рациональную пространственную компоновку оборудования в цеху.

Кроме того, системы компьютерного моделирования технологических процессов должны быть ориентированы на пользователя (инженера-технолога), использование их не должно требовать глубокого знания языков программирования, быть естественным и близким к методам традиционного проектирования. В наибольшей степени этому соответствуют современные среды моделирования, использующие концепции ООП – объектно-ориентированного проектирования (программирования) и ООМ – объектно-ориентированного моделирования, а также средства визуального создания модели из графических блоков и связей между ними. Это, например, Simulink, Vissim, Scicos, GPSS и другие. В данной работе применяется пакет MvStudium (MvS), отличительной особенностью которого является использование для описания математической модели формализма гибридного автомата [1, 2, 3].

Следует отметить, что выполнение вышеперечисленных задач моделирования предполагает трактовать технологический процесс как сложную динамическую систему с моделированием, в том числе случайных факторов с наличием параллельных процессов и обратных связей в ее структуре.

Важным вопросом является подготовка исходных материалов для построения подобной сложной модели. Для построения компонентной MvS-модели технологического процесса наиболее подходящими представляются функциональные технологические схемы, которые достаточно широко используются в инженерной практике. На рисунке 1 представлена функциональная технологическая схема производства железобетонных изделий [4].

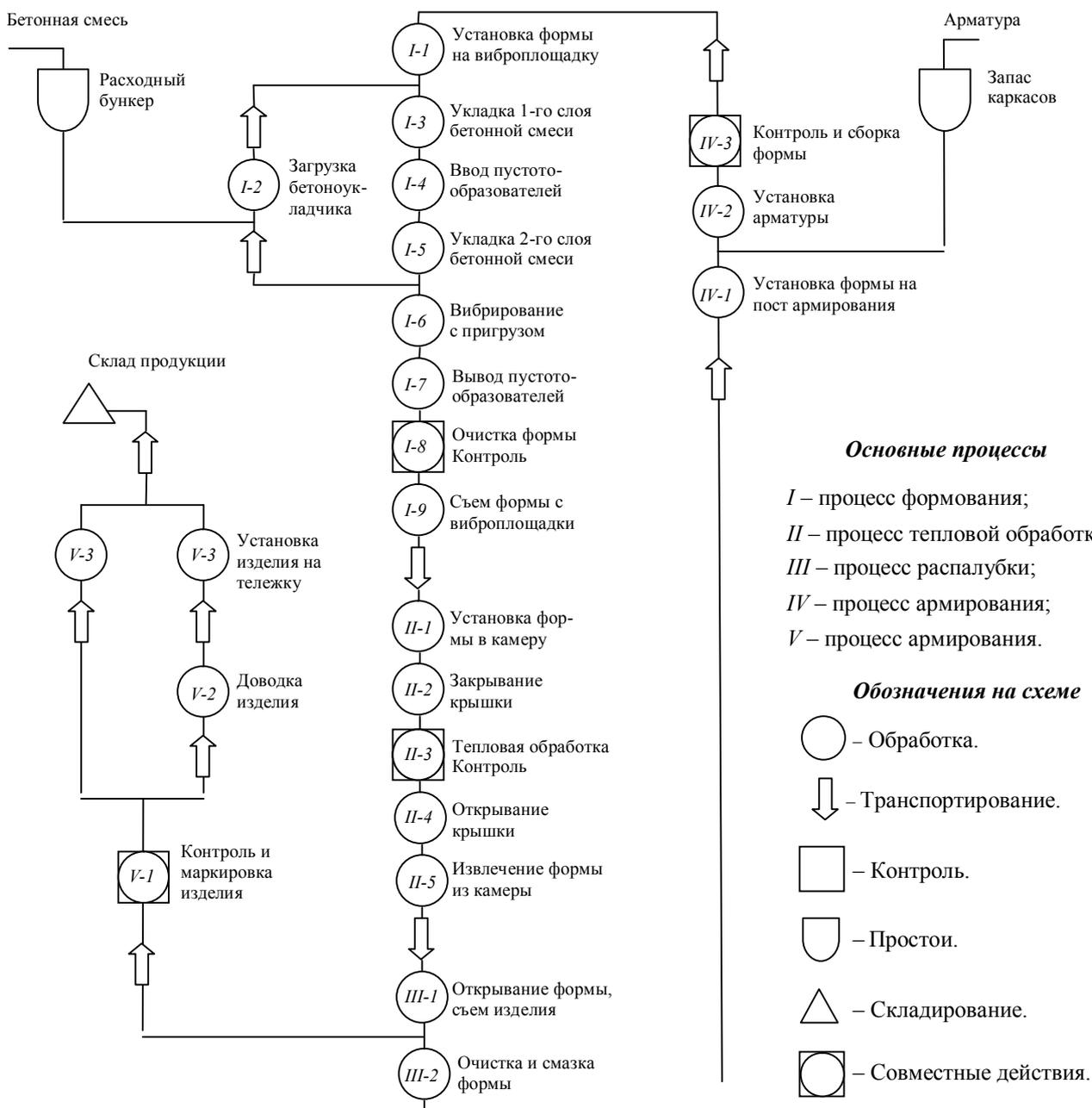


Рисунок 1 – Функциональная технологическая схема технологической линии агрегатного производства ЖБИ

На основе этой схемы в среде MvS построена компонентная структура (рис. 2). Структура состоит из компонентов – классов, моделирующих работу механических агрегатов: двух мо-

стовых кранов, бетоноукладчика, формоукладчика, виброплощадки, пустотообразователя, пригрузочного щита. Эти блоки являются открытыми системами, которые описаны как гибридные автоматы. Гибридным автоматам, в свою очередь, предписывается в зависимости от требуемого действия либо непрерывная деятельность, либо также формализм гибридного автомата.

Класс Main\_1 используется как управляющий блок, который через соответствующие связи передает остальным блокам данные – вектора, содержащие рабочие параметры агрегатов, а также управляющие сигналы. Синхронизация работы агрегатов обеспечивается связями в нижней части рисунка 2.

При проектировании технологического процесса важными фактором является не только последовательность операций, но и длительность элементарных циклов. Она зависит от производительности машин и агрегатов, скорости движения грузоподъемного и грузотранспортирующего оборудования, возможности проведения параллельных, совмещенных во времени процессов. Обычно оптимальная длительность циклов определяется графоаналитическим методом – построением циклограмм. Если циклограмма совмещена с планом цеха в соответствующем масштабе, то такая схема отражает взаимодействие машин и агрегатов как во времени, так и в пространстве. На рисунке 3 изображена такая схема для производства ЖБИ.

При моделировании построение циклограммы автоматизируется (синхронизация), работа агрегатов обеспечивается связями в нижней части рисунка 2.

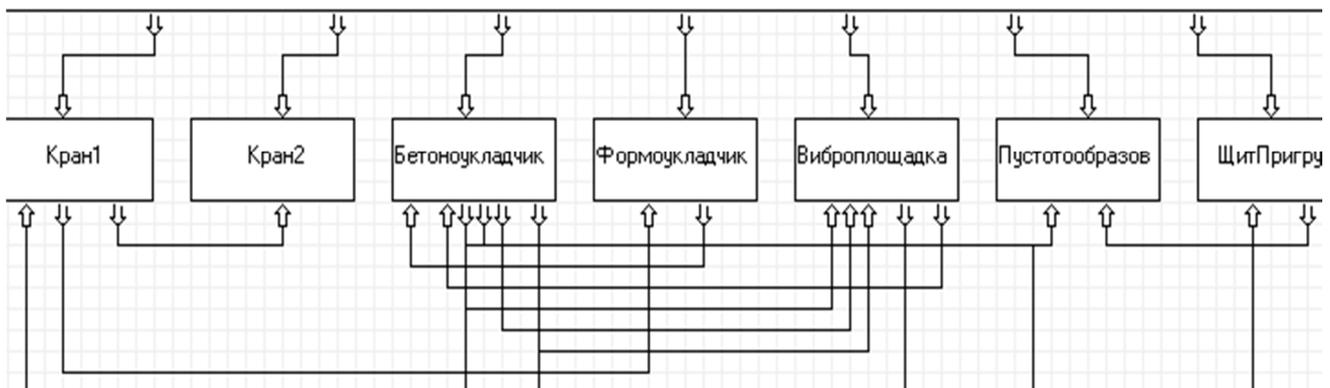


Рисунок 2 – Структура MvS-модели технологического процесса производства ЖБИ

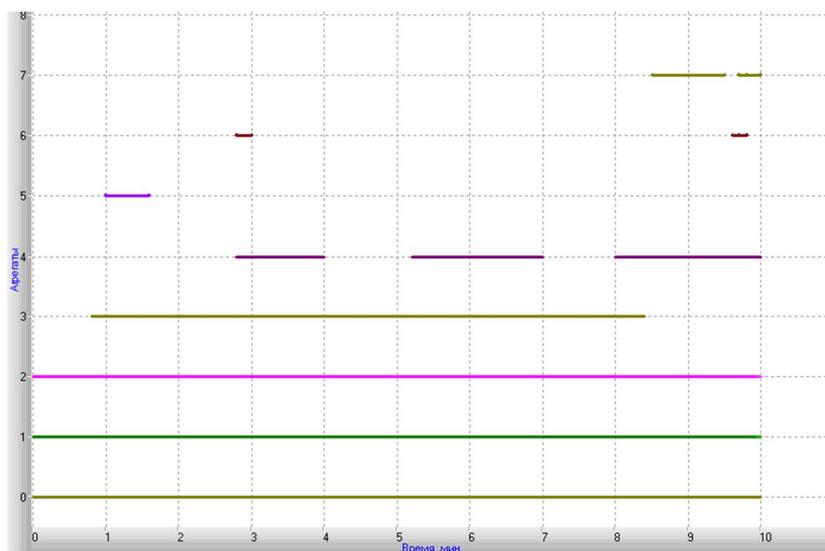
На рисунке 4 приведены результаты моделирования работы машин и агрегатов технологической линии агрегатного производства ЖБИ во времени, соответствующие рисунку 3. По вертикальной оси циклограммы расположены агрегаты в следующем порядке: 1 – мостовой кран №1, 2 – мостовой кран №2, 3 – бетоноукладчик, 4 – виброплощадка, 5 – формоукладчик, 6 – пустотообразователь, 7 – пригрузочный щит.

В результате гибридной деятельности отдельных блоков, моделирующей работу соответствующих агрегатов, производятся необходимые расчеты и строятся требуемые графики. На рисунке 5 приведена циклограмма работы и перемещения в пространстве бетоноукладчика. По вертикальной оси отсчитывается расстояние, пройденное бетоноукладчиком вдоль продольной оси цехового пролета.

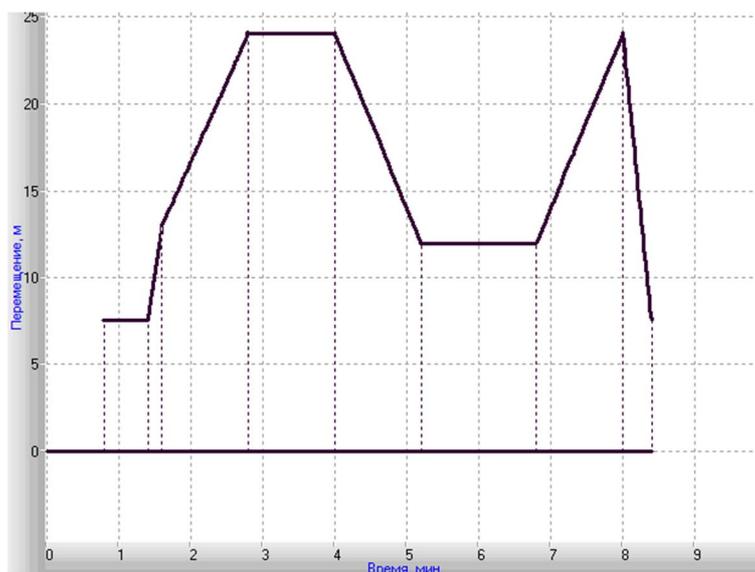


1 – каретка с пустообразователями; 2 – бетоноукладчик; 3 – виброплощадка; 4 – формоукладчик; 5 – пригрузочный щит; 6 – посты армирования форм; 7 – установка для электронагрева арматуры; 8 – камера тепловой обработки; 9 – мостовой кран; 10 – посты очистки и смазки форм; 11 – зона выдерживания изделий; 12 – самоходная тележка для вывоза изделий.  
 К<sub>1</sub> ... К<sub>13</sub> – работа крана N<sub>1</sub>; К<sub>1</sub>' ... К<sub>16</sub>' – работа крана N<sub>2</sub>; Б<sub>1</sub> ... Б<sub>9</sub> – работа бетоноукладчика;  
 В<sub>1</sub> ... В<sub>6</sub> – работа виброплощадки; Ф<sub>1</sub> ... Ф<sub>2</sub> – работа формоукладчика;  
 П<sub>1</sub> ... П<sub>4</sub> – работа пустообразователя; Щ<sub>1</sub> ... Щ<sub>4</sub> – работа пригрузочного щита.

**Рисунок 3 – Циклограмма работы машин и агрегатов технологической линии агрегатного производства ЖБИ**



**Рисунок 4 – Циклограмма работы машин и агрегатов технологической линии агрегатного производства ЖБИ, полученная при моделировании в среде MvS**



*Рисунок 5 – Циклограмма работы бетоноукладчика, полученная при моделировании в среде MvS*

Таким образом, созданная и испытанная на тестовом примере MvS-модель показала применимость изложенного подхода к моделированию технологических процессов производства строительных изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы [Текст] / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – С. Петербург, БХВ, 2006. – 224 с.
2. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход [Текст] / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – С. Петербург, БХВ, 2006. – 192 с.
3. Янченко, В.С. Математическое моделирование процесса подбора состава песчаной смеси [Текст] / В.С. Янченко, Н.П. Лукутцова, Е.В. Дегтярев, Е.Л. Королева, С.В. Ширко // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – №4 (42). – С. 66-71.
4. Стефанов, В.В. Технология бетонных и железобетонных изделий [Текст] / В.В. Стефанов, Н.Г. Русанова, А.А. Волянский – Киев: Вища школа, 1982. – 406 с.

#### **Янченко Виктор Степанович**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел.: +7 906 502 79 58  
E-mail: vsy50@mail.ru

#### **Лукутцова Наталья Петровна**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Доктор технических наук, профессор  
Тел.: +7 915 801 44 19

#### **Королева Елена Леонидовна**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент  
Тел.: +7 920 605 50 90

#### **Выпова Анастасия Сергеевна**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
Студент  
Тел.: +7 915 804 14 08  
E-mail: asja\_91@mail.ru

V.S. JANCHENKO, N.P. LUKUTCOVA, E.L. KOROLEVA, A.S. VYPOVA

## APPLICATION OF THE METHOD OF HYBRID AUTOMATON IN COMPUTER SIMULATION OF THE PROCESS OF MANUFACTURE OF FERRO-CONCRETE

*The basic methodical approaches applied at mathematical modelling on the computer of technological processes of manufacture of building materials are considered. The formalism of the hybrid automatic machine as the most effective for modelling of difficult systems is thus used. The model of manufacture of ferro-concrete products by the agregatno-line way, developed in the environment of Model Vision Studium (MvS) is described.*

**Keywords:** *mathematical model, technological process, ferro-concrete products, hybrid automaton, cyclogramme process.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Kolesov, Ju.B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy [Tekst] / Ju.B. Kolesov, Ju.B. Senichenkov. – S. Peterburg, BHV, 2006. – 224 s.
2. Kolesov, Ju.B. Modelirovanie sistem. Ob'ektno-orientirovannyj podhod [Tekst] / Ju.B. Kolesov, Ju.B. Senichenkov. – S. Peterburg, BHV, 2006. – 192 s.
3. Janchenko, V.S. Matematicheskoe modelirovanie processa podbora sostava peschanoj smesi [Tekst] / V.S. Janchenko, N.P. Lukutcova, E.V. Degtjarev, E.L. Koroleva, S.V. Shirko // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №4 (42). – S. 66-71.
4. Stefanov, V.V. Tehnologija betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij [Tekst] / V.V. Stefanov, N.G. Rusanova, A.A. Voljanskij – Kiev: Vishha shkola, 1982. – 406 s.

#### **Yanchenko Viktor Stepanovich**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Candidate of technical sciences, associate professor  
Ph.: +7 906 502 79 58  
E-mail: vsy50@mail.ru

#### **Lukutsova Natalia Petrovna**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Doctor of technical sciences, professor  
Ph.: +7 915 801 44 19

#### **Koroleva Elena Leonidovna**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Candidate of technical sciences, associate professor  
Ph.: +7 920 605 50 90

#### **Vypova Anastasia Sergeevna**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Student  
Ph.: +7 915 804 14 08  
E-mail: asja\_91@mail.ru

**Отзыв**

на монографию С.В. Федосова, Ю.А. Щепочкиной,  
М.В. Акуловой, Н.Н. Науменко, Н.К. Анисимовой  
**«Современные методы отделки стеновых  
строительных материалов»**

В 2012 году издательством ФБГОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет» опубликована монография «Современные методы отделки стеновых строительных материалов» представляет собой труд известных ученых из России и Беларуси и свидетельствует об интеграционном научном процессе в данной области знаний. В монографии рассмотрен ряд разнообразных методов высокотемпературной отделки стеновых материалов, включая ангобирование, глазурирование, оплавление. Особый интерес для читателя представляют методы высокотемпературной отделки керамических и безобжиговых материалов с применением плазмы, описания конструкций используемого оборудования, рациональные режимные параметры отделки.

Плазменная обработка строительных материалов это развивающееся научное направление, позволяющее получать строительные композиты с принципиально новыми физико-химическими и физико-механическими характеристиками повышенной декоративности.

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разным видам отделки строительных материалов – цементных композитов, силикатов, керамики, рассмотрены вопросы взаимодействия плазмы с поверхностью материалов, и, что особенно ценно, приведены математические модели теплопереноса в системе «расплав – подложка». Для безобжиговых строительных материалов предложены эффективные способы закрепления защитно-декоративных покрытий на их поверхности, путем пропитки полимерами, позволяющие увеличить адгезию отделочных слоев к подложке до 10 раз.

Книга хорошо иллюстрирована, интересна и полезна не только специалистам, работающим непосредственно с плазменными технологиями, но и руководителям предприятий, инженерно-техническим работникам. Результаты работы могут использоваться в образовательном процессе при подготовке специалистов высшей квалификации.

Зав. лабораторией «Химия и технология  
нелинейных процессов» ФГБУН Института  
химии растворов им. Г.А. Крестова РАН

д.т.н., проф.



Падохин В.А.

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей**

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

**Обязательные элементы:**

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем – 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

**С полной версией требований к оформлению научных статей**  
**Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unprk.ru](http://www.gu-unprk.ru)**

---

*Адрес учредителя журнала*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29  
+7 (4862) 42-00-24  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302020, г. Орел, ул. Московская, 77.  
+7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: oantc@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор С.В. Солопов  
Компьютерная верстка С.В. Солопов

Подписано в печать 29.10.2012 г.

Формат 70×108 1/16. Печ. л. 7,63.

Тираж 400 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической  
базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.