



Научно-технический журнал  
Издается с 2003 года.  
Выходит шесть раз в год.

**№2 (52) 2014**  
**(март-апрель)**

# 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:

**Бок Т.** д.т.н., проф. (Германия)  
**Бондаренко В.М.** акад. РААСН, д.т.н., проф.  
**Гордон В.А.** д.т.н., проф.  
**Емельянов С.Г.** советник РААСН, 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.  
**Рымшин В.И.** чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
**Сергейчук О.В.** д.т.н., проф. (Украина)  
**Серник И.Н.** д.т.н., проф.  
**Сикора З.** д.т.н., проф. (Польша)  
**Тамразян А.Г.** д.т.н., проф.  
**Тур В.В.** д.т.н., проф. (Белоруссия)  
**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. (Германия)

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: str\_and\_rek@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», 2014

## Содержание

### **Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции**

- Булгаков А.Г., Дыба В.П., Скибин Г.М., Булгакова И.Г.** Постановка и решение задачи о взаимодействии строительных сооружений на свайных фундаментах с сейсмическими волнами..... 3
- Киселев Д.А.** Апробация разработанной методики расчета реконструируемых железобетонных пролетных строений..... 15
- Май Дык Минь.** Эквивалентная жесткость сборной обделки при изгибе тоннеля в плоскости, перпендикулярной оси тоннеля..... 21
- Плотников В.В., Копачева М.В.** Совершенствование стыков конструкций и монтажной оснастки в системе безригельного каркаса с целью ускорения его возведения..... 27
- Сидоров А.В.** Определение геометрической жесткости кручения тонкостенной трубы прямоугольного сечения методом интерполяции по коэффициенту формы..... 35
- Черняев А.А., Прокуров М.Ю., Шляхов С.В.** Физико-механические и геометрические аналоги в двумерных задачах строительной механики и теории упругости..... 39

### **Архитектура и градостроительство**

- Ходотова Е.А.** Эволюция теоретических знаний в области освоения береговых территорий городов..... 46

### **Строительные материалы и технологии**

- Акулова М.В., Селиверстова О.В.** Влияние комплексной пластифицирующе-воздухововлекающей добавки на свойства цементного теста и прочность цементного камня различного минералогического состава. 56
- Лукутцова Н.П., Кулеш И.А., Мацаенко А.А.** Снижение радиоактивности природного и техногенного сырья при производстве строительных материалов..... 62
- Соломенцев А.Б., Куликова А.В., Бухтияров С.В.** Сравнительная оценка некоторых свойств дорожного битума с различными полимерными добавками и асфальто вяжущего на его основе..... 68

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.

**№2 (52) 2014**  
**(March-April)**

# 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.

**Kirichuk 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

**Bock T.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

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

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

**Emelyanov S.G.** 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.

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

**Sergeychuk O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)

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

**Sikora Z.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

**Tamrazyan A.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)

**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. (Germany)

## 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: oantc@ostu.ru

Journal is registered in Russian federal service  
for monitoring communications, information  
technology and mass communications  
The certificate of registration:  
ПИ № ФС77-47354 frim 03.04.11 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2014

## Contents

### Theory of engineering structures.

#### Building units

- Bulgakov A., Dyba V., Skibin G., Bulgakova I.** Formulation and solution of the interaction problem of building structures on pile foundations since seismic waves..... 3
- Kiselev D.** Testing of the developed methods for calculating the concrete long-span structures under reconstruction..... 15
- Mai Duc Minh.** Equivalent bending stiffness of shield tunnel..... 21
- Plotnikov V., Kopacheva M.** Perfection of the construction joints in the ungirder frame to accelerate installation works..... 27
- Sidorov A.** Task solution of the rotation bars with a cross section in rectangle thin-walled closed area using the interpolation method by the form factor..... 35
- Chernyaev A., Prokurov M., Shlyakhov S.** Physicomechanical and geometrical analogues in two-dimensional problems of construction mechanics and elasticity theories..... 39

### Architecture and town-planning

- Hodotova E.** The evolution of theoretical knowledge in the development of coastal areas of cities..... 46

### Construction materials and technologies

- Akulova M, Selivyorstova O.** The influence of complex air-entraining plasticizer on the properties of cement paste and the strength of cement stone of different mineralogical composition..... 56
- Lukutcova N., Kulesh I., Macaenko A.** Reduction of radioactivity of natural and technogenic raw materials for construction materials..... 62
- Solomentsev A., Kulikova A., Bukhtiyarov S.** Comparison of some properties road bitumen with different polymer additives and asphalt the knitting based thereon..... 68

УДК 624.1 (078.5)

БУЛГАКОВ А.Г., ДЫБА В.П., СКИБИН Г.М.,  
БУЛГАКОВА И.Г.

**ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ  
О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
НА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТАХ С СЕЙСМИЧЕСКИМИ  
ВОЛНАМИ**

*В статье рассматривается применение метода предельного анализа при решении динамической задачи расчета взаимодействия поверхностных сейсмических волн с сооружением на свайном фундаменте, обеспечивающего учет работы и строительных конструкций и грунтовой среды в пластическом состоянии. В процессе решения вокруг сваи строится пространственное поле скоростей грунтовой среды.*

***Ключевые слова:** метод предельного анализа, строительные сооружения, расчет конструкций, сейсмостойкость, свайные фундаменты.*

**Введение**

В настоящее время здания, фундаменты зданий и грунтовые основания рассчитывают в основном как упругие системы. Это приводит в ряде случаев к большим ненужным запасам в несущей способности конструкций и, следовательно, к нерациональному с экономической точки зрения расходованию материала. Требуется учет работы и строительных конструкций и грунтовой среды в пластическом состоянии. При проектировании зданий и сооружений следует учитывать, что сильное землетрясение – явление относительно редкое, поэтому полное сохранение всех элементов здания представляется экономически нецелесообразным, так как срок службы некоторых зданий может быть меньше периода повторяемости сильных землетрясений. Здесь главное – обеспечение безопасности людей и сохранение наиболее ценного оборудования. Этому требованию не противоречит допущение ограниченных зон пластического течения в грунтовом основании и пластических шарниров в железобетонных конструкциях. Рассматриваемая в данной статье методика позволяет оценить параметры взаимодействия сооружения и грунтового основания в пластической стадии для случая свайного фундамента.

**Предельный момент инерции**

При увеличении нагрузки на строительную конструкцию, передающую и перераспределяющую нагрузку на грунтовое основание (различные виды фундаментов, в том числе свайные, подпорные стенки, анкера и т.д.), наступает в некоторый момент состояние общей текучести. Это состояние системы «строительная конструкция – грунтовое основание» характеризуется нестабилизированным ростом деформаций при постоянных внешних нагрузках. При исследовании такого состояния системы используются модели упругопластического и жесткопластического тела. Термин «идеальная» пластичность понимается в том смысле, что среда не обладает упрочнением.

При проектировании строительной конструкции на грунтовом основании вместо точного значения несущей способности, требующего знания полного решения, можно использовать нижние оценки несущей способности, получить которые менее затруднительно. При этом неизвестный запас прочности может быть оценен с помощью верхних оценок несущей способности.

Несущая способность может быть оценена сверху и снизу на основании экстремальных свойств предельных состояний текучести. Эти свойства выражаются двумя теоремами. Рассмотрим их применительно к системе «свайный фундамент – грунтовое основание», на которую воздействуют поверхностные сейсмические волны.

Рассмотрим схему (рис. 1), моделирующую жесткое сооружение на фундаменте из свай-стоек.

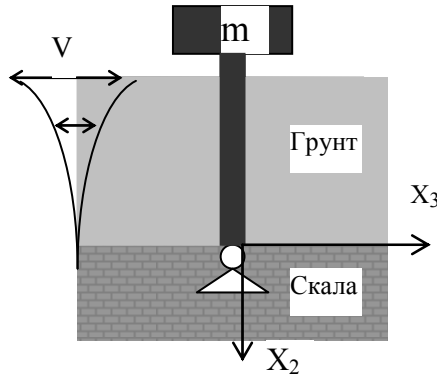


Рисунок 1 – Схема сооружения на сваях-стойках

По основанию в виде слоя грунта на скальном полупространстве проходит поверхностная сейсмическая волна. Собственные колебания основания вынуждают колебаться сооружение на свайном фундаменте. При этом возникают силы инерции (момент инерции относительно заделки сваи-стойки в грунт), действующие со стороны свайного фундамента на окружающий грунт. Если эти силы не приводят к появлению пластических областей вокруг свай, то система «сооружение – основание» находится в упругом или жестком состоянии. При достижении моментом инерции предельного значения вокруг сваи появится область пластического течения.

Следуя идеям А.А. Гвоздева [1], рассмотрим верхние и нижние оценки неизвестного предельного момента, действующего со стороны свайного фундамента на грунт.

1. Пусть  $v_i$  – скорости грунта относительно сваи, определяющие нормальное пластическое течение грунта вокруг сваи;  $\sigma_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}$  – соответствующие данному течению напряжения и скорости деформаций;  $M$  – неизвестный предельный момент инерции, вызывающий поворот сваи относительно грунта с угловой скоростью  $\omega$ ;  $\gamma$  – объемный вес грунта.

Пусть  $\sigma_{ij}^*$  – некоторое допустимое напряженное состояние, соответствующее моменту  $M^*$ .

Составим уравнения равновесия в форме Лагранжа как для истинного, так и для допустимого состояния, принимая за поле виртуальных скоростей истинное неизвестное поле скоростей:

$$\int_V \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} dV = M\omega + \int_V \gamma \cdot v_2 dV, \quad (1)$$

$$\int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij} dV = M_*\omega + \int_V \gamma \cdot v_2 dV, \quad (2)$$

где  $V$  – область, занимаемая слоем грунта.

Вычитая (2) из (1), получим:

$$(M - M_*) \cdot \omega = \int_V (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*) \cdot \dot{\epsilon}_{ij} dv. \quad (3)$$

В качестве исходного постулата принимаем принцип Мизеса (п. 1.2):

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*) \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \geq 0. \quad (4)$$

Тогда на основании неравенства (4) интеграл в правой части уравнения (3) неотрицателен и, следовательно,  $M \geq M^*$ .

Отсюда ясно, что источником нижних оценок предельного значения момента инерции  $M^*$  являются статически допустимые поля напряжений (для которых выполняются условия равновесия и условие на функцию текучести  $f(\sigma_{ij}) \leq 0$ ) в теле фундамента и во всем основании.

2. Рассмотрим верхние оценки предельного момента на околосвайную грунтовую область. Пусть  $v_{ij}^*, \dot{\epsilon}_{ij}^*$  – произвольное кинематически допустимое поле скоростей и скоростей деформаций в теле свайного фундамента и в грунтовом слое. Такое поле соответствует угловой скорости сваи  $\omega^*$ . По данным скоростям деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}^*$  определяются напряжения  $\sigma_{ij}^*$  единственным образом там, где поверхность текучести строго выпукла, в остальной области  $\sigma_{ij}^*$  выбираются с известной долей произвола. Напряжения  $\sigma_{ij}^*$  не обязательно удовлетворяют уравнениям равновесия.

Выпишем уравнения равновесия в форме Лагранжа, принимая  $V_i^*$  за поле виртуальных скоростей:

$$\int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* dV = M\omega^* + \int_V \gamma \cdot v_2^* dV. \quad (5)$$

Вычтем в левой части равенства (5) величину мощности пластического деформирования, соответствующую кинематически допустимому полю скоростей  $v_i^*$ .

Тогда:

$$\int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* dV - \int_V (\sigma_{ij}^* - \sigma_{ij}) \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* dV = M\omega^* + \int_V \gamma v_2^* dV. \quad (6)$$

Но в силу того, что  $\sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* \geq \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^*$  согласно принципу Мизеса (для скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}^*$  «истинные» напряжения будут  $\sigma_{ij}^*$ ), второй член в левой части уравнения (6) неотрицателен.

Отсюда:

$$\int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* dV \geq M\omega^* + \int_V \gamma v_2^* dV$$

или

$$M \leq \frac{1}{\omega^*} \left( \int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* dV - \int_V \gamma v_2^* dV \right).$$

Следовательно, верхняя оценка предельного момента определяется по формуле:

$$M^* = \frac{1}{\omega^*} \left( \int_V \sigma_{ij}^* \cdot \dot{\epsilon}_{ij}^* dV - \int_V \gamma v_2^* dV \right). \quad (7)$$

Вычисляя нижние и верхние оценки, получаем «коридор», куда должно попадать известное значение предельного момента. Ясно, что совпадение нижних и верхних оценок говорит о том, что получено точное значение предельного момента.

Если при расчете колебаний сооружения, например, при оценке демпфирующей способности свайного фундамента при сейсмическом нагружении, использовать верхние оценки предельного момента, то рассчитанные амплитуды колебаний будут превышать действительные, а оценка демпфирующей способности будет дана с запасом.

#### **Постановка задачи о взаимодействии сооружений с сейсмическими волнами**

Методы волновой механики в инженерной сейсмологии стали широко применяться в нашей стране после выхода работы Е.Ф. Саваренского [2], в которой сформулированы задачи волновой механики применительно к потребностям сейсмостойкого строительства. В работе большое внимание уделено изучению поверхностных волн в слое, получены новые формулы для вычисления перемещений, скоростей и ускорений в волнах Рэлея и Лява с учетом отражения интерферирующих волн от границ слоя. Был установлен тот факт, что для волн Лява энергия колебаний при вполне определенных углах падения интерферирующих волн остается в пределах слоя.

При выходе упругих сейсмических волн из скального основания в поверхностный слой нескальных грунтов в нем образуется сложная волновая сетка. Если при напряжениях в упругой волне, выходящей из скального основания, критерий прочности грунта достигает критического значения, то в поверхностном слое возникают две волны – упругая и пластическая, распространяющиеся с различными скоростями. Однако на некотором расстоянии от эпицентра вне ближней зоны сейсмические колебания становятся практически периодическими и гармоническими.

Особый интерес представляет случай гармонических собственных колебаний основания, при этом зоны пластического течения грунта возникают только вокруг фундамента, являясь результатом взаимодействия сейсмической волны и сооружения.

На основании опыта строительства и анализа последствий землетрясений установлены некоторые особенности поведения зданий, сооружаемых на различных грунтах. По действующим сейчас строительным правилам грунты разделяются на три категории. Наиболее благоприятными считаются грунты первой категории, а наиболее неблагоприятными – третьей. Сейсмичность площадки, сложенной грунтами первой категории, принимается на балл меньше, чем балльность сейсмического района, а сейсмичность строительной площадки, сложенной грунтами третьей категории, принимается на балл больше.

Такой прием в проектировании в целом правильный, однако, не учитывает взаимодействия здания и грунтового основания при сейсмическом воздействии. Накопленные данные о последствиях землетрясений свидетельствуют о том, что не все здания и сооружения одинаково хорошо ведут себя на грунтах первой категории. Все постройки в зависимости от применяемых конструкций и строительных материалов условно подразделяются на жесткие и гибкие. Жесткие – это кирпичные, каменные, крупноблочные здания, а гибкие – каркасные высотные здания, мачты, трубы и т.д. Опытные данные говорят о том, что часто жесткие здания хуже ведут себя на грунтах первой категории, лучше – в грунтах второй и третьей категории. Гибкие здания и сооружения, наоборот, устойчивее в плотных скальных грунтах. Это объясняется тем, что в спектре колебаний скальных грунтов при землетрясении преобладают высокочастотные, короткопериодические составляющие, в рыхлых – низкочастотные, длиннопериодные. Соответственно, собственные колебания жестких зданий являются высокочастотными, короткопериодическими, а гибкие сооружения имеют низкую частоту собственных колебаний. При размещении жестких зданий на плотных скальных грунтах возможны разрушения из-за резонансных явлений. Подобные явления могут происходить и при размещении гибких сооружений на рыхлых грунтах.

Следовательно, изучение взаимодействия зданий и сооружений с грунтовыми основаниями при землетрясениях является необходимым для обеспечения сейсмостойкости.

Традиционный способ повышения сейсмостойкости сооружений заключается в усилении прочности конструкций за счет больших размеров их сечений, при этом стараются увеличить прочность материалов строительных конструкций. Этот способ содержит в себе некоторое противоречие, так как одновременно увеличивается вес и жесткость конструкций, что в свою очередь повышает сейсмическую нагрузку.

Для того чтобы ограничить колебания зданий при землетрясениях, применяется демпфирование. Демпфирующие устройства основаны на поглощении избыточной энергии в результате пластической деформации. Элементами таких устройств могут служить, например, трубы из пластического металла, вдавливающиеся одна в другую (внутренний диаметр внешней трубы чуть меньше диаметра входящей трубы). После сильного толчка такие элементы могут быть заменены. Энергия поглощается также в областях пластического течения грунта, примыкающих к фундаменту. Ясно, что вопросы демпфирования не могут быть решены в рамках упругих моделей сооружения и грунтового основания.

С помощью пластической модели рассмотрим вопрос о возможном ограничении колебаний здания по сравнению с колебаниями грунтовой среды для самого перспективного с точки зрения демпфирования фундамента на сваях-стойках.

Предлагаемая [3, 4] методика позволяет определить по прочностным характеристикам грунта, бетона, арматуры, по моменту инерции сооружения появление зон пластического течения грунта в околосвайном пространстве. При наличии пластических зон проявляется эффект демпфирования. Полученные решения позволяют определить отношение амплитуд скоростей фундамента и окружающего грунта. Методика не противоречит действующим правилам расчета на сейсмостойкость, но дополняет их, позволяя в ряде случаев обоснованно снижать сейсмическую нагрузку на строительные конструкции здания. Актуальность методики подчеркивается тем, что вне всяких расчетов нормы ряда стран показывают, что одни и те же здания на свайных фундаментах выдерживают сейсмические нагрузки на 20% большие, чем на ленточных фундаментах, и на 10% большие, чем на фундаментах в виде сплошной плиты. Это полностью соответствует мнению Н.А. Цытовича и В.Г. Березанцева, приведенному в классическом учебнике [5]: «По-видимому, в ряде случаев при заделке концов свай в плотные грунты и надежном закреплении их голов в прочных ростверках существенную помощь в работе на сейсмические воздействия могут оказать свайные фундаменты».

### **Решение задачи о взаимодействии сооружения на свайных фундаментах с поверхностной волной Лява**

Сейсмостойкость сооружений, их фундаментов и оснований оценивается расчетом по первой группе предельных состояний на особое сочетание нагрузок, которое включает сейсмическое воздействие. В условиях очевидной неопределенности типа, интенсивности и направления возможного сейсмического воздействия, переменчивости инженерно-геологического строения грунтового основания сооружения расчет на сейсмические нагрузки по необходимости носит упрощенный условный характер.

Традиционные методы расчета сейсмостойкости оснований и фундаментов заключаются, как правило, в замене динамического воздействия грунтовой среды на фундамент некоторыми дополнительными силами и переходе к статическому расчету. При этом считают, что сейсмическая сила инерции может иметь любое направление, из которых выбирают наиболее невыгодное. Чаще всего эту силу считают горизонтальной. При проектировании также исключают случаи совпадения периода собственных колебаний сооружения с предполагаемым периодом сейсмических колебаний, чтобы избежать явления резонанса.

Авторы [3, 4] считают, что расчет взаимодействия сейсмических волн в грунтовой среде с фундаментом и сооружением позволит в некоторых условиях более точно найти силы, действующие на фундамент, амплитуду и частоту колебаний фундамента. Инженерно-геологическое строение грунтового основания, тип выбранного фундамента, статистические и геологические данные о расстояниях до возможных эпицентров землетрясений позволяют конкретизировать и уточнить расчет на сейсмостойкость оснований и фундаментов.

В ряде районов, например на Черноморском побережье, применяются сваи-стойки, прорезающие слой относительно слабых грунтов и опирающиеся на скальное основание. Расстояния до эпицентров зарегистрированных землетрясений достаточно большие. Строение основания и расстояние до возможных эпицентров определяют, что наибольшую опасность для зданий и сооружений в этом случае представляют поверхностные волны, в частности волны Лява.

Рассмотрим [6] упругий слой постоянной толщины  $H$  с упругими постоянными Ламе  $\lambda$ ,  $\mu$  плотностью  $\rho$ , лежащий на упругом полупространстве с параметрами  $\lambda_*$ ,  $\mu_*$ ,  $\rho_*$  (рис. 1).

Заметим, что постоянные Ламе связаны с модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\nu$  следующими формулами:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

Предположим, что скорость распространения  $S$ -волн в слое  $c_2$  меньше соответствующей скорости  $c_2^*$  в полупространстве.

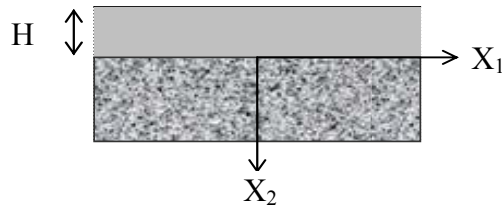


Рисунок 2 – Грунтовый слой на скальном полупространстве

Ляв нашел такое решение в перемещениях для слоя и полупространства уравнений Ламе теории упругости, в котором отличны от нуля только компоненты перемещений  $u_3$  и  $u_{3*}$ , которые при этом не зависят от  $x_3$ . Такая волна является поперечной, так как  $div \vec{u} = 0$ . В полученном решении перемещения выражаются следующими формулами:

$$u_3 = C \left[ \cos(\alpha q x_2) - \frac{\mu_* \beta}{\mu \alpha} \sin(\alpha q x_2) \right] \cos(q(x_1 - ct)),$$

$$u_{3*} = C e^{-q\beta x_2} \cos(q(x_1 - ct)),$$
(8)

где  $C$  – произвольная постоянная;  $q$  – заданная частота;  $c$  – фазовая скорость ( $c_2 < c < c_{2*}$ );

$$\alpha = \sqrt{\frac{c^2}{c_2^2} - 1}; \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_{2*}^2}}.$$

Из уравнения:

$$tg(\alpha q H) = \frac{\mu_* \beta}{\mu \alpha}$$
(9)

находится отношение  $c/c_2$  как функции параметров  $qH$ ,  $c_2/c_{2*}$ ,  $\mu_*/\mu$ .

Полученное решение представляет собой волну, бегущую в направлении оси  $x_1$  со скоростью  $c$ . Перемещения в волне лежат в плоскости, перпендикулярной направлению их распространения, и параллельны границам слоя. Согласно уравнению (6.9) фазовая скорость волны зависит от их частоты, следовательно, эти волны имеют дисперсию.

Пусть начало координат лежит в основании сваи-стойки (рис. 2).

Дифференцируя первое выражение из (8) по времени, преобразуя его и полагая  $x_1 = 0$ , получим скорость грунтовой среды:

$$V_3 = A \sin(\alpha q x_2 - \psi) \sin(cqt),$$
(10)

где  $A$  – произвольная постоянная, а

$$\psi = \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_* \beta}{\mu \alpha}\right)^2}}.$$

На поверхности раздела при  $x_2 = 0$  скорость грунтовой среды:

$$V_3 = -A \sin \psi \sin(cqt).$$
(11)

Со скоростью (11) перемещается точка  $O$  (рис. 3) – точка опоры сваи на скальное основание.

Вычитая из скорости (10) скорость (11), получим скорость грунтовой среды, обтекающей сваю-стойку:

$$V_3 = A[\sin(\alpha q x_2 - \psi) + \sin \psi] \sin(cqt).$$

Будем считать приближенно зависимость  $V_3$  от  $x_2$  на отрезке  $[-H, 0]$  линейной, т.е.

$$V_3 = -Ak \frac{x_2}{H} \sin(cqt),$$
(12)

где  $k = -\sin(\alpha q H + \psi) + \sin \psi$ .



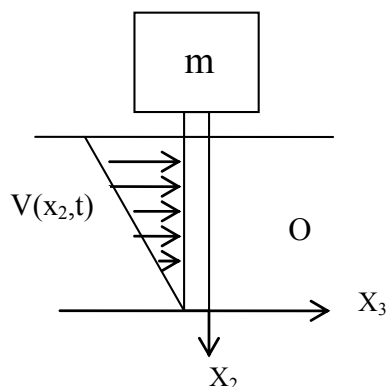


Рисунок 3 – Грунтовый слой на скальном полупространстве

Под воздействием внешних сил свая-стойка будет поворачиваться вокруг начала координат с угловой скоростью  $\dot{\omega}$ , следовательно, точки сваи будут иметь линейную скорость:

$$V_c = \dot{\omega} x_2.$$

Тогда скорость грунтовой среды относительно сваи определится по формуле:

$$V_o = V_3 - V_c = \left[ -\frac{A}{H} k \sin(cqt) - \dot{\omega} \right] x_2.$$

Рассмотрим поле скоростей в пластическом грунте, обтекающем сваю. Выберем слой грунта, толщиной  $dx_2$ , перпендикулярный оси  $x_2$ .

Экстремальные принципы предельных состояний текучести говорят, что по любому кинематически допустимому полю скоростей в пластической системе, соответствующему ассоциированному (нормальному) закону течения, находятся предельные нагрузки, не меньшие действительных.

Рассмотрим простейшее кусочно-постоянное поле скоростей (рис. 4), образованное скольжением недеформированных блоков друг относительно друга [7].

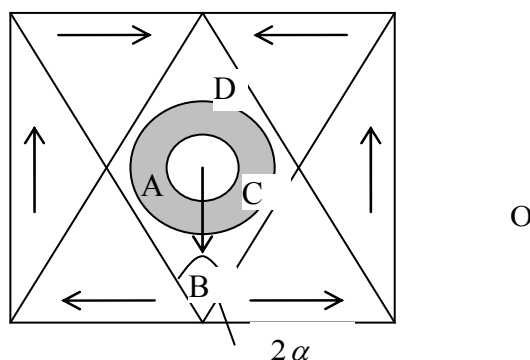


Рисунок 4 – Кусочно-постоянное поле скоростей

Вне движущихся блоков поле скоростей нулевое, т.е. в данном случае считаем, что свая движется со скоростью  $V_o$  в пластическом грунте. Такое поле скоростей не противоречит нормальному закону течения для среды, обладающей только сцеплением, для глин, скальных пород. Приблизительно этот прием можно применить и для супесчаных грунтов, обладающих трением, учитывая внутреннее трение повышенным коэффициентом сцепления.

Следуя работе [3], построим диаграмму относительных скоростей (рис. 5), считая, что свая с некоторой ромбовидной областью (блок А) движется с единичной скоростью.

Обозначим  $M_{\text{внутр}}$  – мощность внутренних сил пластического деформирования системы, которая равна сумме произведений величины сцепления грунта  $c_f$  на площади поверхностей скольжения и на величину относительной скорости между блоками.

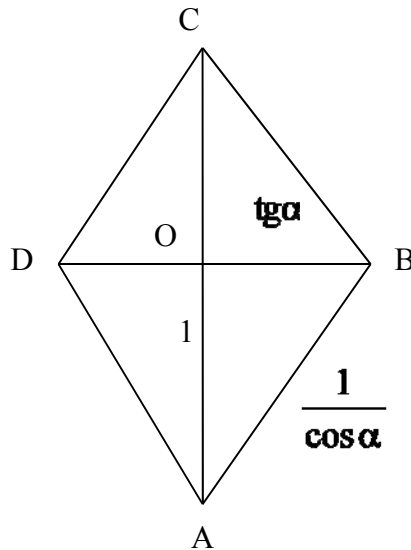


Рисунок 5 – Диаграмма скоростей

Тогда дифференциал этой величины выразится следующей формулой:

$$dM_{\text{внутр}} = 8Rf(\alpha)V_0c_{\Gamma}dx_2, \quad (13)$$

где  $R$  – радиус поперечного сечения сваи;

$$f(\alpha) = \frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{2\sin \alpha} + \frac{1}{\sin \alpha(\cos \alpha)^2}.$$

Из уравнения  $f'(\alpha) = 0$  найдем значение угла  $\alpha = 0,632$  радиан или  $\alpha = 36,2^\circ$  градусов, при котором наши верхние оценки нагрузок на сваю будут наилучшими (наименьшими) для выбранного множества возможных полей скоростей. При значении  $\alpha = 0,632$  функция  $f(\alpha) = 37,5$ . Интегрируя (13) по длине сваи, получим мощность внутренних сил пластического деформирования грунтовой среды:

$$M_{\text{внутр}} = 37,5c_{\Gamma}R \int_{-H}^0 V_0 dx_2$$

или

$$M_{\text{внутр}} = 37,5c_{\Gamma}R \frac{H^2}{2} \left[ \dot{\omega} + \frac{A}{H} k \sin(cqt) \right]. \quad (14)$$

Обозначим искомый момент, действующий на сваю как  $M_c$ , тогда мощность внешних сил, действующих на пластический грунт, определится по формуле:

$$M_{\text{внеш}} = M_c \left( \dot{\omega} + \frac{A}{H} k \sin(cqt) \right). \quad (15)$$

Из равенства выражений (14) и (15) найдем верхнюю оценку величины  $M_c$ , при этом превышение нагрузки, действующей на сваю, идет в запас расчета. Учтем, что момент  $M_c$  противодействует движению сваи совместно с грунтом,двигающимся мимо нее с относительной скоростью  $V_0$ , с помощью знака:

$$M_c = -\text{sign} \left[ \dot{\omega} + \frac{A}{H} k \sin(cqt) \right] 37,5c_{\Gamma}R \frac{H^2}{2}. \quad (16)$$

Уравнение колебаний модели строительной конструкции, представленной на рис. 3, вокруг начала координат выглядит так:

$$J_{x1} \ddot{\omega} = M_c, \quad (17)$$

где  $J_{x1}$  – момент инерции массы строительной системы относительно оси  $Ox_1$ , а величина  $M_c$  выражается формулой (16).

Взаимодействие сейсмической волны с фундаментом из железобетонных свай-стоек описывается уравнением (17).

Если ввести обозначение:

$$a = \frac{18,75c_{\Gamma}RH^2}{J_{x1}}, \quad (18)$$

то уравнение (17) можно записать как

$$\ddot{\omega} = -a \cdot \text{sign} \left( \dot{\omega} + \frac{A}{H} k \sin(cqt) \right). \quad (19)$$

Уравнение (19) – обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) сооружение находится в покое, следовательно, к уравнению (19) нужно дописать начальные условия:

$$\omega(0) = 0, \quad \dot{\omega}(0) = 0. \quad (20)$$

Решение задачи (19), (20) о взаимодействии сейсмической волны и свайного фундамента с высоким ростверком рассматривается в системе координат с началом в точке  $O$  (рис. 3). Данная система не является инерционной, так как точка  $O$  совершает колебательные движения в направлении оси  $x_3$  относительно инерциальной системы координат (для решения технических задач в качестве такой выбирают систему, жестко связанную с неподвижной поверхностью Земли). Следовательно, решение задачи определяет относительное движение массы  $m$ . Относительное движение материальной «точки» можно рассматривать как абсолютное движение, если к действующим на точку силам присоединить переносную и кориолисову силы инерции.

Движение системы с началом в точке  $O$  является поступательным. Поэтому кориолисова сила нулевая, а переносная сила инерции определяется по формуле  $\Phi = -ma_0$ , где  $a_0$  равно производной от выражения (11) по времени, т.е.  $a_0 = -Acq \sin \psi \cos(cqt)$ .

Тогда вместо уравнения (6.19) получим следующее уравнение колебаний:

$$J_{x1}\ddot{\omega} = M_c + \Phi \cdot H. \quad (21)$$

Рассмотрим сооружение массой  $m$ , опирающееся на  $n$  свай-стоек, которые прорезают слой относительно слабых грунтов и передают нагрузку на скальное основание (рис. 6).

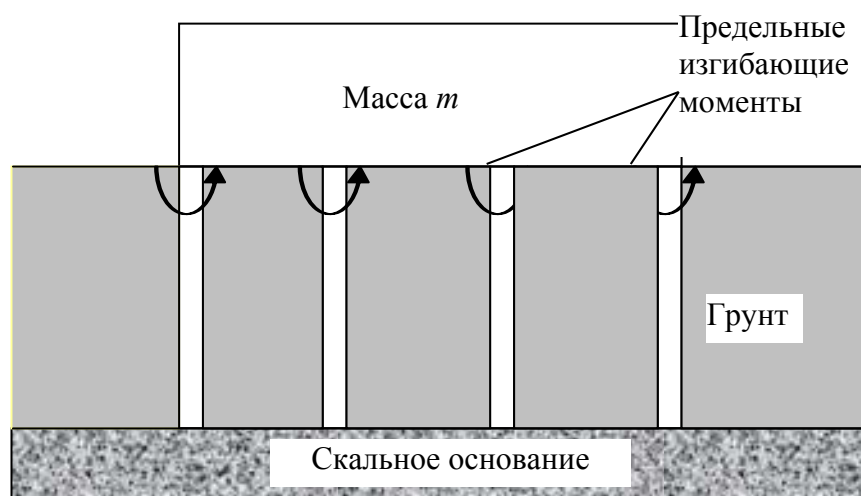


Рисунок 6 – Сооружение на сваях-стойках

Так как длина сейсмической поверхностной волны много больше размеров сооружения, можно считать, что сейсмическая волна вокруг каждой колонны находится в одной и той же

фазе. Это позволяет рассматривать одно уравнение вида (21) для всего здания. В отличие от расчетной схемы на рисунке 3 для кинематической допустимости горизонтальных колебаний жестких свай под сооружением необходимо появление пластических шарниров в местах заделки железобетонных свай в ростверк. В пластическом шарнире величина предельного изгибающего момента  $M_{пр}$  вычисляется по формуле:

$$M_{пр} = \sigma_T S_a h,$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести рабочей арматуры;  $S_a$  – площадь рабочей арматуры;  $h$  – расстояние от оси арматуры до центра сжатой области.

Момент  $M_{пр}$  противодействует повороту сваи вокруг точки  $O$  в любом направлении и, следовательно, имеет знак, противоположный знаку угловой скорости  $\dot{\omega}$ .

Тогда уравнение (21) можно записать следующим образом:

$$J_{x1} \ddot{\omega} = M_c + \Phi \cdot H - \text{sign}(\dot{\omega}) \cdot n \sigma_T S_a h. \quad (22)$$

Уравнение колебаний (22) для здания на  $n$  сваях-стойках разделим на момент инерции  $J_{x1}$ , тогда оно будет выглядеть так:

$$\ddot{\omega} = -a \cdot \text{sign} \left( \dot{\omega} + \frac{A}{H} k \sin(cqt) \right) + b \cos(cqt) - s \cdot \text{sign}(\dot{\omega}); \quad (23)$$

$$\text{где } b = \frac{Amcq \sin(\psi) H}{J_{x1}}; \quad (24)$$

$$s = \frac{n \sigma_T S_a h}{J_{x1}}, \quad (25)$$

а величина  $a$  находится по формуле (18).

Проведенный расчет колебаний массивного сооружения на сваях-стойках при сейсмическом воздействии по приведенной методике показывает, что амплитуда колебаний скоростей сооружения более чем в два раза уменьшена по сравнению с амплитудами колебаний скоростей грунта на поверхности. Отношение наибольшей амплитуды угловой скорости свай к амплитуде угловой скорости слоя грунта является характеристикой величины демпфирования сейсмических колебаний слоя грунта свайным фундаментом. Если его значение менее 1, то фундамент на сваях-стойках обладает демпфирующим свойством, т.е. возникает возможность уменьшения балла сейсмичности площадки строительства при их применении.

### Выводы

Поставлена задача об исследовании взаимодействия свайного фундамента с поверхностными сейсмическими волнами с учетом появления зон пластического течения в околосвайном грунтовом основании и пластических шарниров в свайном фундаменте. При решении задачи о взаимодействии сейсмических волн со свайными фундаментами впервые применены методы предельного анализа.

Выведено уравнение колебаний сооружения на сваях-стойках при прохождении волны Лява. Определен критерий  $\Delta$ , по значениям которого можно судить об образовании пластических зон вокруг свай при сейсмических нагрузках и о проявлении демпфирующих свойств свайного фундамента. На основе численных расчетов оценены демпфирующие свойства системы «железобетонный свайный фундамент – грунтовое основание».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев, А.А. Определение величины разрушающей нагрузки для систем, претерпевающих пластические деформации [Текст] // А.А. Гвоздев // Труды конференции по пластическим деформациям. М.; Л.: АН СССР, 1938. – С. 19-30.
2. Саваренский, Е.Ф. Сейсмические волны [Текст] / Е.Ф. Саваренский. – М.: Наука, 1972. – 305 с.
3. Солодовник, Н.В. Взаимодействие сейсмической волны Лява с сооружением на свайном фундаменте [Текст] / Н.В. Солодовник, В.П. Дыба // Известия вузов. Серия «Технические науки». – 2005. – С. 34-40.

4. Дыба, В.П. Жесткопластический анализ взаимодействия поверхностных сейсмических волн со свайными фундаментами [Текст] / В.П. Дыба, Н.В. Солодовник // Численно-аналитические методы: сб. науч. тр. – Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т., 2005. – С. 11-15.

5. Цытович, Н.А. Основания и фундаменты. Краткий курс [Текст] / под ред. Н.А. Цытовича. – М.: Высш. шк., 1970. – 384 с.

6. Амензаде, Ю.А. Теория упругости [Текст] / Ю.А. Амензаде. 3-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1976. – 272 с.

7. Дыба, В.П. О приложении предельного анализа к основаниям и фундаментам [Текст] / В.П. Дыба // Российская геотехника – шаг в XXI век: Тр. юбил. конф., посвящ. 50-летию РОМГГиФ (Москва, 15-16 марта 2007). – М.: РОМГГиФ, 2007.

**Булгаков Алексей Григорьевич**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор, проректор

Тел.: +7 (4712) 50-48-18

E-mail: a.bulgakow@gmx.de

**Дыба Владимир Петрович**

Южно-Российский государственный политехнический университет им. Атамана М.И. Платова

Доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленно-гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение»

Тел.: +7 863 525 55 68

E-mail: vladimir.dyba@mail.ru

**Скибин Геннадий Михайлович**

Южно-Российский государственный политехнический университет им. Атамана М.И. Платова

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленно-гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение»

Тел.: +7 863 525 55 68

E-mail: g.m.skibin@yandex.ru

**Булгакова И.Г.**

Южно-Российский государственный политехнический университет им. Атамана М.И. Платова

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительно-дорожные машины и коммунальная техника»

Тел.: +7 863 525 56 24

E-Mail: i.bulgakowa@mail.ru

---

A. BULGAKOV, V. DYBA, G. SKIBIN, I. BULGAKOVA

**FORMULATION AND SOLUTION OF THE INTERACTION  
PROBLEM OF BUILDING STRUCTURES ON PILE  
FOUNDATIONS SINCE SEISMIC WAVES**

*The article discusses the use of marginal analysis method for solving the problem of calculating the dynamic interaction of surface seismic waves with the construction of pile foundation for providing accounting work and structures and soil environment in a plastic state. In tackling the pile is built around a spatial velocity field soil environment.*

**Keywords:** *method of limit analysis, building construction, structural analysis, seismic resistance, pile foundations.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Gvozdev, A.A. Opredelenie velichiny razrushajushhej nagruzki dlja sistem, preterpevajushhijh plasticheskie deformacii [Tekst] // A.A. Gvozdev // Trudy konferencii po plasticheskim deformacijam. M.; L.: AN SSSR, 1938. – S. 19-30.

2. Savarenskij, E.F. Sejsmicheskie volny [Tekst] / E.F. Savarenskij. – M.: Nauka, 1972. – 305 s.

3. Solodovnik, N.V. Vzaimodejstvie sejsmicheskoj volny Ljava s sooruzheniem na svajnom fundamente [Tekst] / N.V. Solodovnik, V.P. Dyba // Izvestija vuzov. Serija «Tehnicheskie nauki». – 2005. – S. 34-40.

4. Dyba, V.P. Zhestkoplasticheskiy analiz vzaimodejstviya poverhnostnyh sejsmicheskikh voln so svaj-nymi fundamentami [Tekst] / V.P. Dyba, N.V. Solodovnik // Chislenno-analiticheskie metody: sb. nauch. tr. – Novocherkassk: Juzh.-Ros. gos. tehn. un-t., 2005. – S. 11-15.
5. Cytovich, N.A. Osnovaniya i fundamenty. Kratkij kurs [Tekst] / pod red. N.A. Cytovicha. – M.: Vyssh. shk., 1970. – 384 s.
6. Amenzade, Ju.A. Teoriya uprugosti [Tekst] / Ju.A. Amenzade. 3-e izd., dop. – M.: Vyssh. shk., 1976. – 272 s.
7. Dyba, V.P. O prilozhenii predel'nogo analiza k osnovanijam i fundamentam [Tekst] / V.P. Dyba // Rossijskaja geotekhnika – shag v XXI vek: Tr. jubil. konf., posvjashh. 50-letiju ROMGGiF (Moskva, 15-16 marta 2007). – M.: ROMGGiF, 2007.

### **A. Bulgakov**

Southwest state university, Kursk  
Doctor of technical sciences, professor, pro-rector  
Ph.: +7 (4712) 50-48-18  
E-mail: a.bulgakow@gmx.de

### **V. Dyba**

South-Russian state technical university, Novocherkassk  
Doctor of technical sciences, professor of the department «Industrial and civil construction»  
Ph.: +7 863 525 55 68  
E-mail: vladimir.dyba@mail.ru

### **G. Skibin**

South-Russian state technical university, Novocherkassk  
Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Industrial and civil construction»  
Ph.: +7 7 863 525 55 68  
E-mail: g.m.skibin@yandex.ru

### **I. Bulgakova**

South-Russian state technical university, Novocherkassk  
Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Construction and road machinery and communal equipment»  
Ph.: +7 863 525 56 24  
E-Mail: i.bulgakowa@mail.ru

КИСЕЛЕВ Д.А.

## АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

*Рассматривается результат усиления моста через реку Тойда. Проведен расчет пролетного строения как до, так и после усиления накладной плитой по СП 35.13330.2011 при помощи программы ЕТАР и по предложенной автором методике, основанной на деформационной модели с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона. Приведены результаты расчета и сравнительный анализ полученных данных.*

**Ключевые слова:** мост, методика расчета, накладная плита, несущая способность, пролетное строение, реконструкция, усиление.

Следуя современному пути развития нормативной базы расчета, автор построил уравнения равновесия для расчета не усиленного [3] и усиленного со стороны сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента по деформационной модели расчета с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона в виде полинома пятой степени (полином Байкова).

Для определения достоверности и точности расчетов проведены следующие расчеты реального объекта – моста через реку Тойда на 321 км автодороги Курск-Саратов, построенного в 1965 и реконструированного в 1994 году. В результате реконструкции выполнено уширение и усиление пролетного строения при помощи накладной плиты для пропуска современных нагрузок.

Пролетное строение до реконструкции состояло из шести балок по типовому проекту выпуска 56 и имело поперечный габарит  $\Gamma 7+2 \times 1,0$  м. В результате реконструкции проезжая часть моста была уширена до 8 м. Крайние балки Б1 и Б6 заменены новыми трапециевидного сечения по индивидуальному проекту. Накладная плита выполнена из бетона класса В25. Ее толщина меняется по ширине пролета от 20 см над крайними балками до 25 см над средними (рис. 1).

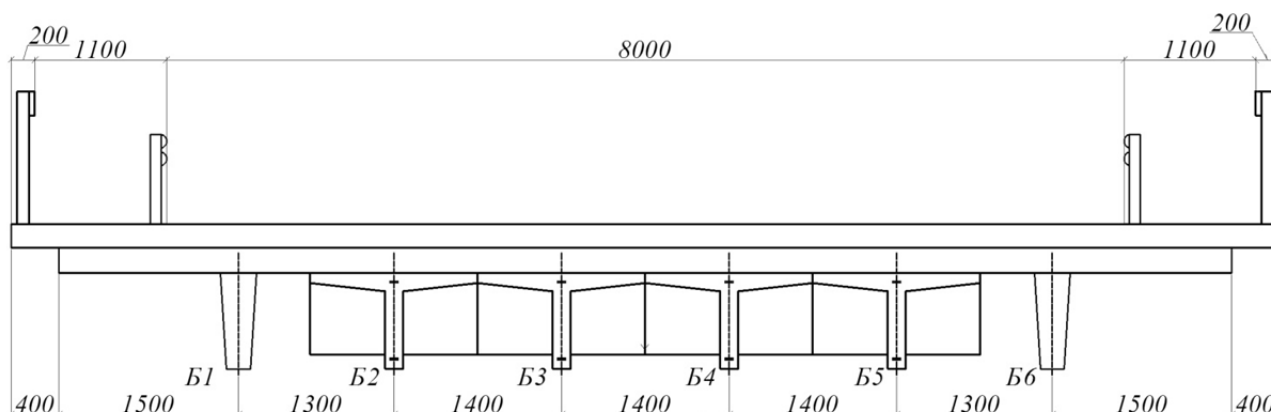


Рисунок 1 – Сечение пролетного строения моста через реку Тойда

Класс бетона средних балок В22,5, арматура А-II, крайние новые балки изготовлены из бетона класса В25 и арматуры класса А-III.

Балка Б2 (рис. 2) выполнена по типовому проекту выпуска 56 с длиной 11,36 м. Класс бетона средних балок В22,5, арматура А-II. Площадь сечения арматуры  $A_s=52,3 \text{ см}^2$ . Расчетное сопротивление арматуры  $R_s=270 \text{ МПа}$ . Расчетное сопротивление бетона  $R_b=13 \text{ МПа}$ .

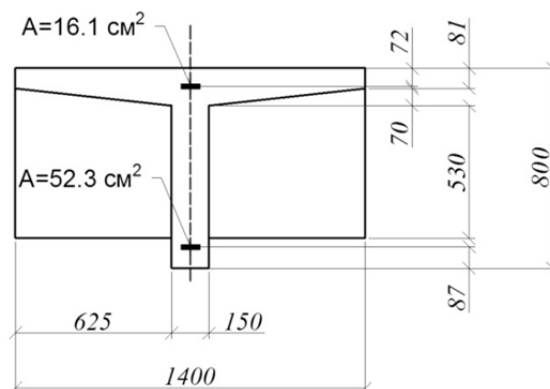


Рисунок 2 – Балка Б2 по типовому проекту выпуска 56

Согласно нормам [2] несущая способность главной балки Б2 до усиления накладной плитой определяется по формуле:

$$M_{\text{пред}} = A_s R_s (h_0 + d - 0,5x), \quad (1)$$

где  $x = A_s R_s / b R_b$  – высота сжатой зоны бетона.

Согласно расчету балки Б2 предельный момент (несущая способность главной балки) составляет  $M_{\text{пр}} = 754$  кНм.

В дополнение к расчету по нормам предлагается расчет в программе ЕТАР (табл. 1). Она разработана сотрудниками кафедры строительной механики ВГАСУ и предназначена для выполнения поэтапного расчета железобетонных конструкций. По результатам расчета в этой программе предельный момент балки Б2 составил  $M_{\text{пр}} = 950$  кНм.

Таблица 1 – Результаты расчета балки Б2 в программе ЕТАР

Вид нагрузки	Значение изгибающего момента, кНм	Величина относительных деформаций в сжатой зоне бетона, $\times 10^{-6}$	Величина относительных деформаций в растянутой зоне арматуры, $\times 10^{-6}$	Напряжения в бетоне, МПа	Напряжения в растянутой арматуре, МПа
Постоянная	348	160	558	4,82	99,3
НК-80	520	276	968	7,95	170
Полная	868	436	1526	12,77	269,3

В работе [3] авторами предложена деформационная модель расчета конструкции с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона. Построена система уравнений (2), решение которой позволяет определить напряженно-деформированное состояние конструкции на любой стадии загрузки. Сечение балки пролетного строения и эпюры распределения напряжений и деформаций по высоте сечения представлены на рисунке 3.

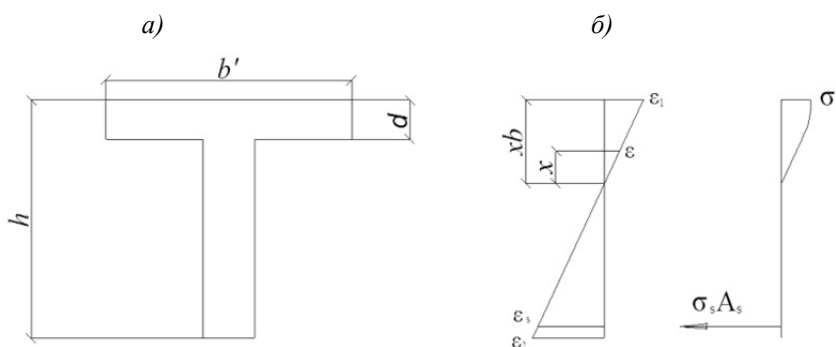


Рисунок 3 – Расчетные схемы не усиленной балки пролетного строения:  
а – приведенное сечение; б – эпюры распределения напряжений и деформаций по высоте сечения



Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = b' * \int_0^{xb} \sigma_b dx + \sigma_s A_s; \\ M = b' * \int_0^{xb} \sigma_b (xb - x) dx - \sigma_s A_s (h - a - xb), \end{cases} \quad (2)$$

После преобразований (2) получим систему двух нелинейных алгебраических уравнений относительных краевых деформаций  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , по которым можно определить все параметры напряженно-деформированного состояния в сечении конструкции. Строго по этой модели расчета написана и зарегистрирована программа для ПК, результаты расчета по которой представлены в таблице 2. Предельный момент балки Б2 составил  $M_{пр}=905$  кНм.

Критериями исчерпания несущей способности являются достижение в сжатой зоне бетона предельной относительной деформации ( $2,2 \times 10^{-3}$ ) или достижение в арматуре расчетного сопротивления  $R_p=270$  МПа.

Таблица 2 – Результаты расчета балки Б2 по предложенной методике.

Вид нагрузки	Значение изгибающего момента, кНм	Величина относительных деформаций в сжатой зоне бетона, $\times 10^{-6}$	Величина относительных деформаций в растянутой зоне арматуры, $\times 10^{-6}$	Напряжения в бетоне, МПа	Напряжения в растянутой арматуре, МПа
Постоянная	348	276	586	5,84	103
НК-80	520	426	892	7,70	157
Полная	868	839	1547	10,29	260

Проанализировав полученные результаты видим, что методы расчета, предложенные в нормативной литературе, не дают достоверной картины работы сечения железобетонного элемента, что приводит к перерасходу материалов (табл. 3).

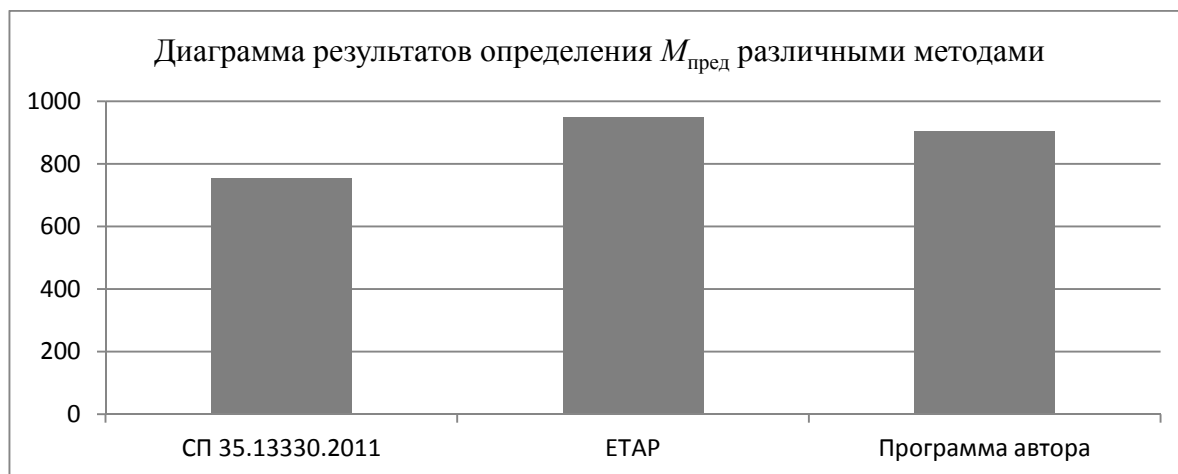


Диаграмма 1 – Результаты расчета балки Б2 разными методиками.

Таблица 3 – Запас несущей способности в процентном отношении к  $M_{пред}$ , полученному по [2]

Метод расчета	СП 35.13330.2011	ЕТАР	Программа автора
$M_{пред}$ , кНм	754	950	905
Процентное соотношение результатов	100%	125,99%	120,03%
Запас несущей способности	0%	25,99%	20,03%

Многочисленные исследования последних лет указывают на то, что расчет конструкций при усилении под нагрузкой требует индивидуального подхода, отличного от проектиро-

вания новых строительных конструкций. Согласно действующим нормативным документам [2] расчет железобетонных конструкций может выполняться традиционными методами, базирующимися на упрощенных эпюрах распределение напряжений по высоте сечения, или по деформационной модели.

Нормы [2] регламентируют расчет усиленного пролетного строения как нового с учетом фактора усиления под нагрузкой, учтенным постоянным коэффициентом условий работы 0,9 при доле постоянной нагрузке более 65% от несущей способности элемента. Данный метод не имеет достаточного обоснования и вызывает большие сомнения с точки зрения точности в граничной зоне применения коэффициента. Исследования последних лет указывают на нелинейный характер зависимости несущей способности усиленных под нагрузкой конструкций от уровня загрузки до усиления.

В ходе реконструкции была устроена накладная плита из бетона класса В25. Ее толщина меняется по ширине пролета от 20 см до 25 см, над интересующей нас балкой Б2 ее толщина составляет 21 см (рис. 3).

Согласно [2] предельный расчетный момент усиленной балки Б2 с учетом повреждений и ползучести бетона составляет  $M_{пр}=733$  кНм. Исходя из полученного результата процент постоянной нагрузки ( $M_{пост}=462$  кНм) от несущей способности составляет 63,03%, т.е. коэффициент 0,9 не применяется. В результате вычислений усиленной балки по формуле (1) имеем предельный момент  $M_{пр}=1261,65$  кНм.

Ниже приведены результаты расчета усиленной балки в программе ЕТАР (табл. 4), в которой была учтена постадийность загрузки, ползучесть и повреждения. По результатам расчета в этой программе предельный момент усиленной балки Б2 составил  $M_{пр}=1170$  кНм.

Таблица 4 – Результаты расчета усиленной балки Б2 в программе ЕТАР

Вид нагрузки	Значение изгибающего момента, кНм	Величина относительных деформаций в сжатой зоне бетона накладной плиты, $\times 10^{-6}$	Величина относительных деформаций в сжатой зоне бетона балки Б2, $\times 10^{-6}$	Величина относительных деформаций в растянутой зоне арматуры, $\times 10^{-6}$	Напряжения в бетоне накладной плиты, МПа	Напряжения в бетоне балки, МПа	Напряжения в растянутой арматуре, МПа
Полная	997	146	413	1145	3,1	4,62	201,9

В работе [1] авторами предложена деформационная модель расчета конструкции, усиленной под нагрузкой, с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона.

Построена система нелинейных уравнений (4) относительно краевых деформаций  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , решение которой позволяет определить напряженно-деформированное состояние конструкции на любой стадии загрузки как до, так и после усиления [1]. Сечение усиленной балки пролетного строения и эпюры распределения напряжений и деформаций по высоте сечения представлены на рисунке 4.

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} P_v = b' * \int_0^{x_b} \sigma_b dx + \sigma_s A_s + b' * \int_{x_b}^{x_b+h_{нл}} \sigma_{b1} dx - \sigma_{s1} A_{s1}; \\ M = b' * \int_0^{x_b} \sigma_b * x * dx - \sigma_s A_s (h - a - x_b) +, \\ + b' * \int_{x_b}^{x_b+h_{нл}} \sigma_{b1} * (x + h_{нл}) * dx + \sigma_{s1} A_{s1} (x_b + h_{нл} - a_1), \end{cases} \quad (4)$$

На первой стадии расчета определяются начальные напряжения и деформации до усиления от постоянной нагрузки, на втором – после усиления накладной плитой, на третьей – от

суммарного действия постоянных и временной нагрузки. Результаты расчета усиленной балки представлены в таблице 5. Предельный момент балки Б2 составил  $M_{пр}=1145$  кНм.

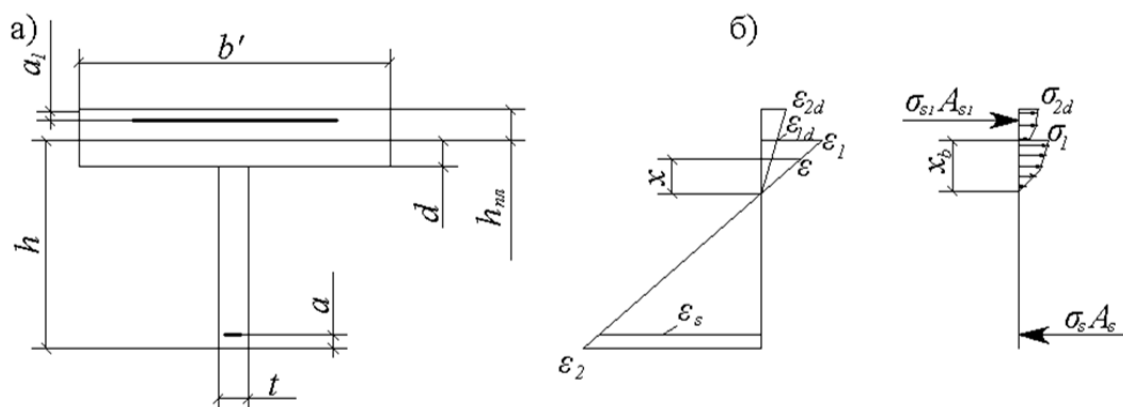


Рисунок 4 – Расчетные схемы усиленной балки пролетного строения:  
а – приведенное сечение; б – эпюры распределения напряжений  
и деформаций по высоте сечения

Таблица 5 – Результаты расчета усиленной балки Б2 по предложенной методике

Вид нагрузки	Значение изгибающего момента, кНм	Величина относительных деформаций в сжатой зоне бетона накладной плиты, $\times 10^{-6}$	Величина относительных деформаций в сжатой зоне бетона балки Б2, $\times 10^{-6}$	Величина относительных деформаций в растянутой зоне арматуры, $\times 10^{-6}$	Напряжения в бетоне накладной плиты, МПа	Напряжения в бетоне балки, МПа	Напряжения в растянутой арматуре, МПа
НК80+ постоянная	997	146	413	1145	3,1	4,62	201,9

Полученные результаты несущей способности усиленной балки сводим в диаграмму 2.

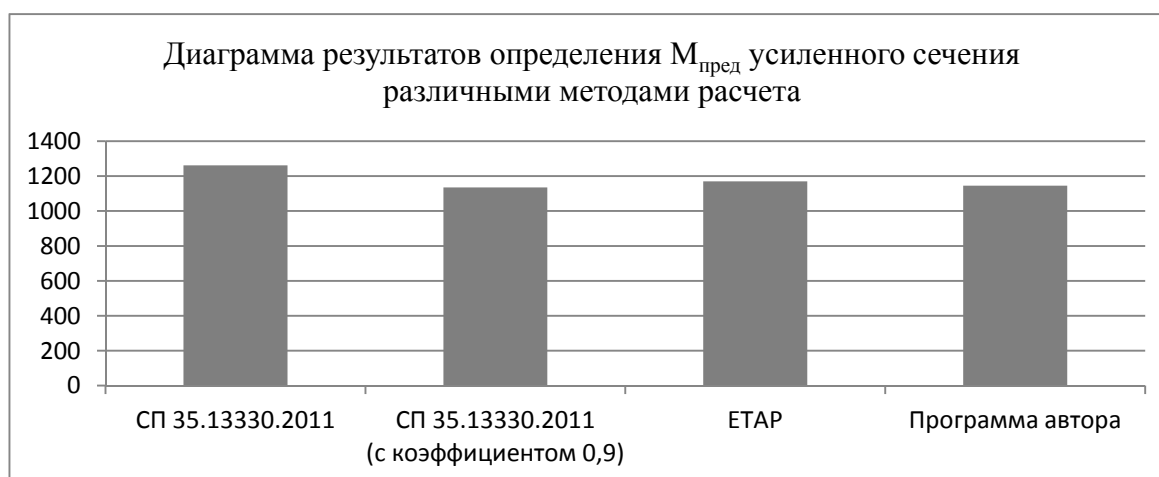


Диаграмма 2 – Результаты расчета усиленной балки Б2 разными методиками

Из нее видно, что расчетная несущая способность, полученная по нормативной методике, сильно завышена. Подобная недостоверная информация может привести к перегрузке главных балок. Попробуем применить коэффициент 0,9 [2], как для балки с уровнем нагружения более 65% (диаграмма 2, столбец 2), получим  $M_{пр}=1135$  кНм (табл. 6).

Таблица 6 – Сравнение несущей способности в процентном отношении к  $M_{пред}$ , полученному по [2]

Метод расчета	СП 35.13330.2011	СП 35.13330.2011 (с коэффициентом 0,9)	ETAP	Программа автора
$M_{пр}$	1262	1135	1170	1145
Процентное соотношение результатов	100%	89,84%	92,71%	90,72%

Полученные результаты показывают, что методы нормативного расчета не имеют обоснования и не дают достаточной точности. Как следствие возникает необходимость в создании новых методов расчета и продвижение их в области практического проектирования. Основной проблемой является скудная база испытуемых балочных строений и малая изученность данного вопроса. Автором уже подобран материал и проведены положительные исследования и сопоставления результатов расчета с реальными объектами, что будет опубликовано в дальнейших работах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев, Д.А. Расчет железобетонного пролетного строения автодорожного моста, усиленного накладной плитой [Текст] / Д.А. Киселев, Н.М. Снятков // Второй всероссийский дорожный конгресс: сб., науч. тр. – М.: МАДИ, МОУ «Дорожный Конгресс», 2010. – С. 398-401.
2. СП 35.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы [Текст]. – 341 с.
3. Киселев, Д.А. Расчет пролетного строения автодорожного моста с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона [Текст] / Д.А. Киселев, Н.М. Снятков // Труды ТГТУ: сборник научных статей. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2010. – Вып. 23. – С. 222-225.

**Киселев Дмитрий Алексеевич**

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Аспирант

E-mail: kiselev-dmitrij-ne@yandex.ru

D. KISELEV

### TESTING OF THE DEVELOPED METHODS FOR CALCULATING THE CONCRETE LONG-SPAN STRUCTURES UNDER RECONSTRUCTION

*The reinforcement of the bridge over the river Toyda is under consideration. There was calculated the deck, both before and after the reinforcement with a lay-on plate, according to CS 35.13330.2011, with the help of the ETAR program and using the method proposed by the author which is based on a deformation model with the use of a non-linear concrete stress-deformation diagram. Here are given the calculation results and the comparative analysis of the obtained data.*

**Keywords:** bridge, calculation methodology, invoice stove, bearing capacity, span structure, reconstruction, strengthening.

### BIBLIOGRAPHY

1. Kiselev, D.A. Raschet zhelezobetonnoego proletnogo stroenija avtodorozhnogo mosta, usilennogo nakladnoj plitoj [Tekst] / D.A. Kiselev, N.M. Snjatkov // Vtoroj vserossijskij dorozhnyj kongress: sb., nauch. tr. – M.: MADI, MOU «Dorozhnyj Kongress», 2010. – S. 398-401.
2. SP 35.13330.2011. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.05.03-84\* Mosty i truby [Tekst]. – 341 s.
3. Kiselev, D.A. Raschet proletnogo stroenija avtodorozhnogo mosta s ispol'zovaniem nelinejnoj dia-grammy deformirovaniya betona [Tekst] / D.A. Kiselev, N.M. Snjatkov // Trudy TG TU: sbornik nauchnyh statej. – Tambov: Tamb. gos. tehn. un-t, 2010. – Vyp. 23. – S. 222-225.

**D. Kiselev**

Tambov state technical university, Tambov

Postgraduate student

E-mail: kiselev-dmitrij-ne@yandex.ru

МАЙ ДЫК МИНЬ

## ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЖЕСТКОСТЬ СБОРНОЙ ОБДЕЛКИ ПРИ ИЗГИБЕ ТОННЕЛЯ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ ОСИ ТОННЕЛЯ

При расчете тоннелей на сейсмические воздействия часто тоннели рассматриваются как балки на упругом основании. В работе приведен метод определения эквивалентной жесткости сборных обделок при изгибе в плоскости, перпендикулярной оси тоннеля.

**Ключевые слова:** тоннель, сборная обделка, эквивалентная жесткость.

При расчете тоннелей на сейсмические воздействия часто используются модели тоннелей в виде балок на упругом основании [2, 5, 6]. В этом случае возникает задача определения жесткости таких балок, так как тоннель не представляет собой однородный цилиндр. Сборная обделка тоннеля представляет собой ряд последовательно установленных в подземной выработке колец, которые в свою очередь состоят из отдельных элементов.

Отдельные элементы сборных тоннельных обделок изготавливаются в основном из железобетона или чугуна, крайне редко сборные обделки выполняются из сварных стальных элементов. В некоторых случаях сборные обделки выполняют из композитных материалов [1].

### 1. Эквивалентная жесткость тоннельной обделки, определяемая деформацией стыка при изгибе

Запишем условия равновесия части конструкции, состоящей из двух половин кольца и поперечного стыка (рис. 1, а). Такую часть конструкции назовем эквивалентным кольцом [3].

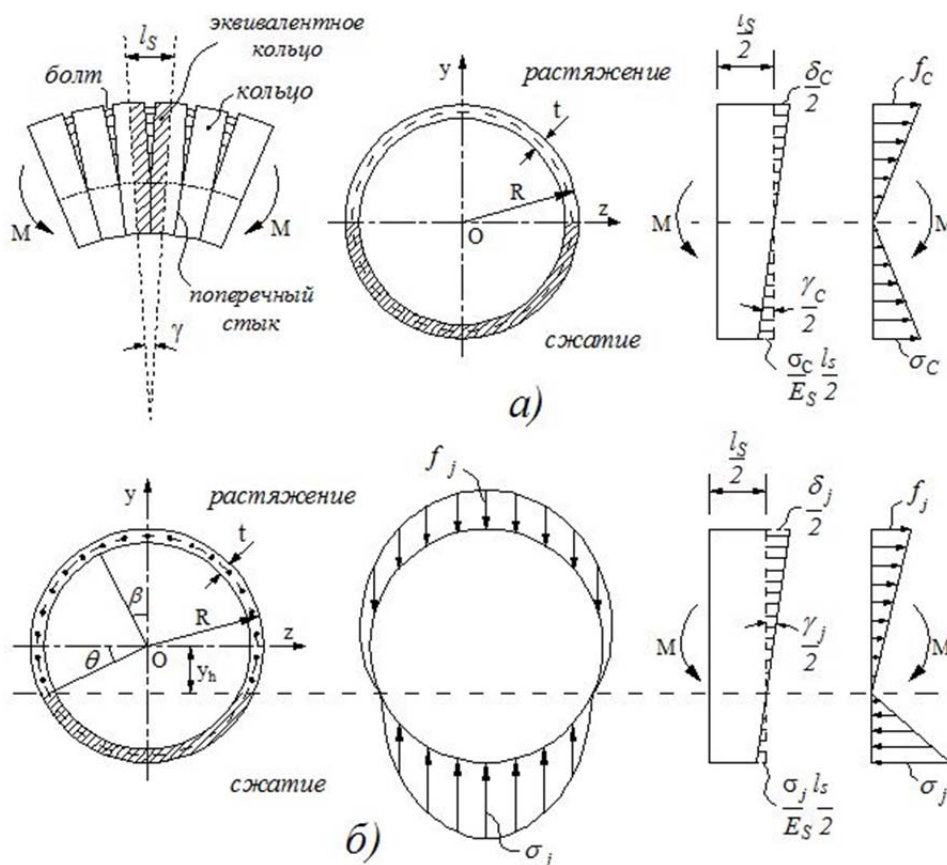


Рисунок 1 – Распределение напряжений и перемещений при повороте поперечного сечения обделки тоннеля; а – в кольце; б – в поперечном стыке

Предположим, что ширина кольца значительно меньше, чем длина сейсмической волны, поэтому изменением напряжений вдоль оси тоннеля при распространении волн пренебрегаем. Толщина обделки значительно меньше, чем радиус тоннеля. В поперечном сечении стыка (рис. 1, б) сумма продольных усилий  $Q$  равна нулю, поэтому:

$$Q = 0 = \int_0^{\pi/2+\theta} 2Rt \frac{f_j (\cos \beta + \sin \theta)}{1 + \sin \theta} d\beta - \int_{\pi/2+\theta}^{\pi} 2Rt \frac{\sigma_j (-\cos \beta - \sin \theta)}{1 - \sin \theta} d\beta$$

$$= \frac{2Rt f_j}{1 + \sin \theta} \left[ \cos \theta + \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta \right] + \frac{2Rt \sigma_j}{1 - \sin \theta} \left[ \cos \theta - \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \theta \right]$$
(4)

Получим:

$$\frac{\sigma_j}{f_j} = \frac{(1 - \sin \theta) \left[ \cos \theta + \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta \right]}{(1 + \sin \theta) \left[ \cos \theta - \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \theta \right]}$$
(5)

где  $\sigma_j$  и  $f_j$  – максимальные напряжения в поперечном стыке при изгибе,  $H / м^2$ ;  $\theta$  – угол, определяющий положение нейтральной оси.

Приравнявая значения угла поворота поперечного сечения стыка (рис. 1, б) выше и ниже нейтральной оси, получим уравнение:

$$\frac{\sigma_j l_s}{2E_s (R - R \sin \theta)} = \frac{1}{R + R \sin \theta} \frac{f_j A_s}{2K_j}$$
(6)

где  $R$  – радиус обделки тоннеля или

$$\frac{\sigma_j}{f_j} = \frac{E_s A_s}{K_j l_s} \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta}$$
(7)

Используя и выражения (6) и (7), получим:

$$\frac{E_s A_s}{K_j l_s} = \frac{\cos \theta + \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta}{\cos \theta - \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \theta}$$
(8)

Решив уравнение относительно угла  $\theta$ , получим:

$$\theta + \cotg \theta = \pi \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{E_s A_s / K_j l_s - 1} \right)$$
(9)

Определим соотношение между изгибающим моментом и продольными напряжениями. Для этой цели найдем изгибающий момент в поперечном сечении стыка.

$$M_{Oz} = \int_0^{\pi/2+\theta} \frac{2Rt f_j (\cos \beta + \sin \theta)}{1 + \sin \theta} R \cos \beta d\beta - \int_{\pi/2+\theta}^{\pi} \frac{2Rt \sigma_j (-\cos \beta - \sin \theta)}{1 - \sin \theta} R \cos \beta d\beta$$

$$= \frac{R^2 t f_j}{1 + \sin \theta} \left[ \frac{\pi}{2} + \theta + \cos \theta \sin \theta \right] + \frac{R^2 t \sigma_j}{1 - \sin \theta} \left[ \frac{\pi}{2} - \theta - \cos \theta \sin \theta \right]$$
(10)

Подставив  $f_j$  выражения (5) в уравнение (10), получим:

$$M_{Oz} = \frac{R^2 t \sigma_j}{1 - \sin \theta} \left\{ \frac{\left( \frac{\pi}{2} + \theta + \cos \theta \sin \theta \right) \left[ \cos \theta - \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \theta \right]}{\cos \theta + \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta} + \frac{\pi}{2} - \theta - \cos \theta \sin \theta \right\}$$

$$= \frac{\pi R^2 t \sigma_j}{1 - \sin \theta} \frac{\cos^3 \theta}{\cos \theta + \left( \frac{\pi}{2} + \theta \right) \sin \theta}$$
(11)

Далее определим зависимость между изгибающим моментом и углом поворота. Значение угла поворота поперечного сечения стыка можно представить в следующем виде:

$$\frac{M_{Oz} l_j}{(EI)_j 2} = \frac{\gamma_j}{2} = \frac{\sigma_j l_s}{2E_s R(1 - \sin \theta)}, \quad (12)$$

или

$$(EI)_j = \frac{M_{Oz} E_s R l_j (1 - \sin \theta)}{\sigma_j l_s}, \quad (13)$$

где  $(EI)_j$  – эквивалентная жесткость сечения поперечного стыка при изгибе.

Используя уравнения (11) и (12) получим выражение, определяющее эквивалентную жесткость поперечного сечения стыка при изгибе сборных обделок:

$$(EI)_j = \frac{E_s I_s l_j \cos^3 \theta}{l_s \cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \sin \theta}, \quad (14)$$

где  $I_s = \pi R^3 t$  – осевой момент инерции поперечного сечения кольца.

## 2. Эквивалентная жесткость при изгибе сборной обделки тоннеля, определяемая деформацией колец и деформацией стыка

Угол поворота поперечного сечения эквивалентного кольца состоит из суммы углов поворота кольца и стыка ( $\gamma = \gamma_c + \gamma_j$ ) [3], поэтому:

$$\frac{M_{Oz} l_s}{(EI)_{eq}} = \frac{M_{Oz} l_s}{E_s I_s} + \frac{M_{Oz} l_j}{(EI)_j}, \quad (15)$$

где  $(EI)_{eq}$  – эквивалентная жесткость сечения обделки при изгибе

или

$$\frac{l_s}{(EI)_{eq}} = \frac{l_s}{E_s I_s} + \frac{l_j}{(EI)_j}, \quad (16)$$

Используя выражения (14) и (16), получим эквивалентную жесткость сечения обделки при изгибе в виде:

$$(EI)_{eq} = E_s I_s \frac{\cos^3 \theta}{\cos^3 \theta + \cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \sin \theta}, \quad (17)$$

## 3. Численное моделирование и анализ конструкции сборной обделки

Для оценки точности аналитической модели выполнено численное моделирование оценки жесткости сборной обделки при изгибе. Рассмотрим конструкцию, состоящую из четырех эквивалентных колец, в виде консольной балке, нагруженной на конце сосредоточенной силой  $P$  (рис. 2).

Полагая, что поперечный стык имеет жесткость  $C_j$  ( $Hm/рад$ ), перепишем выражение (14)  $C_j$  в виде:

$$C_j = \frac{(EI)_j}{l_j} = \frac{E_s I_s}{l_s} \frac{\cos^3 \theta}{\cos \theta + \left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \sin \theta}, \quad (18)$$

Рассмотрим две расчетной схемы.

Первая расчетная схема состоит из колец с жесткостями сечений при изгибе  $E_s I_s$  и шарниров с жесткостью  $C_j$  (рис. 2, б). Такая схема использована с использованием программного комплекса SAP2000. Вторая расчетная схема состоит из монолитной обделки с эквивалентной жесткостью сечения при изгибе (рис. 2, в). Эта схема использована для получения аналитического решения.

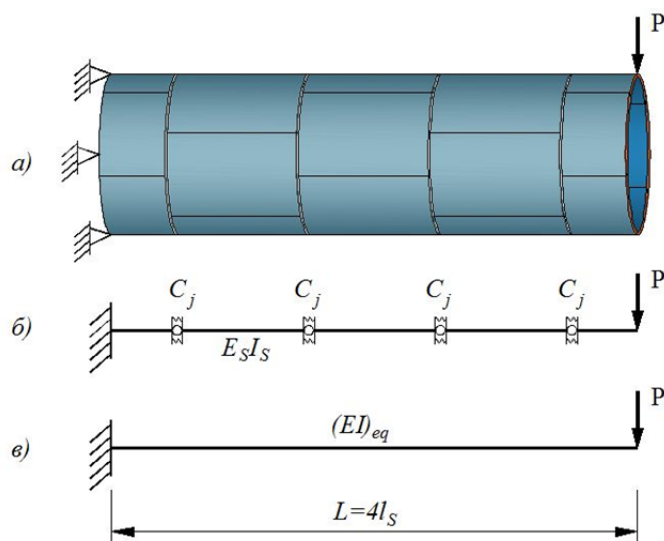


Рисунок 2 – Моделирование и расчетная схема сборной обделки тоннеля

Рассмотрим сборную железобетонную обделку со следующими параметрами [1]:

- наружный радиус обделки  $R = 3,1 \text{ м}$ ;
- толщина обделки  $t = 0,35 \text{ м}$ ;
- модуль упругости бетона  $E_s = 3,45 \times 10^7 \text{ КН / м}^2$ ;
- коэффициент Пуассона бетона  $\nu_c = 0,3$ ;
- количество болтов в поперечном стыке  $n = 17$ ;
- длина болта  $l_j = 0,4 \text{ м}$ ;
- диаметр болта  $d_j = 0,03 \text{ м}$ ;
- модуль упругости болта  $E_j = 2,1 \times 10^8 \text{ КН / м}^2$ .

Приведены примеры при различных ширинах колец. Результаты расчетных параметров представлены в таблице №1.

Таблица 1 – Параметры конструкции сборной обделки

$l_s$ (м)	$E_s A_s$ (КН)	$K_j$ (КН / м)	$\varphi$ (рад)	$E_s I_s$ (КНм <sup>2</sup> )	$(EI)_j$ (КНм <sup>2</sup> )	$C_j$ (КНм / рад)	$(EI)_{eq}$ (КНм <sup>2</sup> )
1	2.22E+08	6.31E+06	0.9547	9.53E+08	2.786E+07	6.966E+07	6.491E+07
1,4	2.22E+08	6.31E+06	0.8884	9.53E+08	2.689E+07	6.722E+07	8.565E+07
1,8	2.22E+08	6.31E+06	0.8352	9.53E+08	2.606E+07	6.515E+07	1.044E+08

Для сравнения получены перемещения свободного конца обделки.

Таблица 2 – Перемещения свободного конца сборной обделки (мм)

Метод решения	$P$ (КН)	$l_s = 1 \text{ м}$	$l_s = 1,4 \text{ м}$	$l_s = 1,8 \text{ м}$
Численное решение	2000	0.650	1.351	2.289
Аналитическое решение		0.657	1.367	2.383
Численное решение	4000	1.300	2.701	4.579
Аналитическое решение		1.315	2.734	4.766
Численное решение	6000	1.950	4.052	6.868
Аналитическое решение		1.972	4.101	7.150
Численное решение	8000	2.600	5.402	9.158
Аналитическое решение		2.629	5.468	9.533



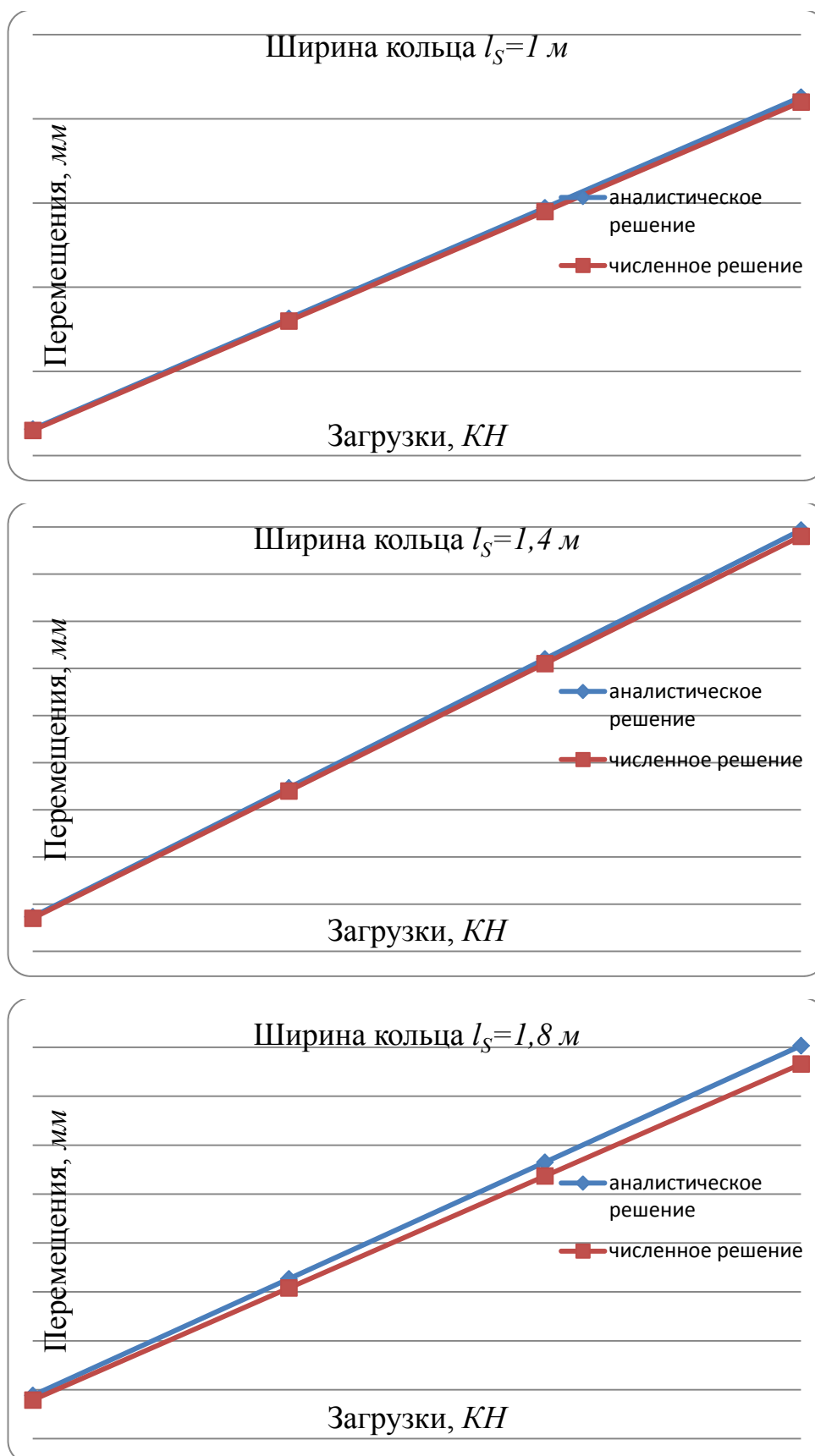


Рисунок 3 – Отношения между нагрузками и вертикальными перемещениями свободного конца сборной обделки

Сравнивая перемещения, полученные с использованием модели с эквивалентной жесткостью с решениями, полученными численными методами, можно отметить незначительное отличие результатов [табл. 2, рис. 3].

### Вывод

Модель сборной обделки в виде балки с эквивалентной жесткостью хорошо описывает поведение тоннеля при изгибе. Это позволяет сделать заключение, что такие модели могут использоваться при расчете тоннелей на сейсмические воздействия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов, И.И. Тоннели, сооружаемые щитовым и специальными способами: Учеб. пос. [Текст]. – М.: РГОТУПС, 2004. – 212 с.
2. W. Zhu, X.Q. Kou, X.C. Zhong, Z.G. Huang. Modification of key parameters of longitudinal equivalent model for shield tunnel. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Proceedings of the 6th international symposium (is-shanghai 2008), shanghai, china, 10-12 april 2008.
3. Te-Fu Chiu, Chi-Tso Chang. Evaluation and Remediation Measures For Shield Tunnels Under Soil Liquefaction.
4. Liao, S.M., Peng, F.L., Shen, S.L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction. Tunnelling and Underground Space Technology 23 (2008) 421-430.
5. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I-C.. Seismic design and analysis of underground structure. Tunn. Undergr. Sp.Technol. 16, 2001, 247-293.
6. Wang, J. Seismic design of tunnels. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc, New York, June 1993.

### Май Дык Минь

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва

Аспирант кафедры «Подземные сооружения»

E-mail: usd.miit@gmail.com; maiducminh\_hn@yahoo.com.vn

---

MAI DUC MINH

### EQUIVALENT BENDING STIFFNESS OF SHIELD TUNNEL

*When calculating the tunnels to seismic effects are often used model of tunnels in the form of beams on elastic foundation. The shield tunnel actually is a slender construction which has many weak spots in the longitudinal direction. Because of the character, the longitudinal non-uniform deformation of the tunnel would happen easily. To evaluate the stress-strain and deformation behavior of a shield tunnel, each ring, which is fabricated by segments and bolts, is regarded as a rigid body with equivalent stiffness and bolts are used to connect these rings. This structure is not continuously, causing difficulties in calculating. This paper presents methods for determining the equivalent bending stiffness of equivalent continuous model of the shield tunnel.*

**Keywords:** tunnel, shield tunnel, equivalent bending stiffness.

### BIBLIOGRAPHY

1. Филиппов, И.И. Тоннели, сооружаемые щитовым и специальными способами: Учеб. пос. [Текст]. – М.: РГОТУПС, 2004. – 212 с.
2. W. Zhu, X.Q. Kou, X.C. Zhong, Z.G. Huang. Modification of key parameters of longitudinal equivalent model for shield tunnel. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Proceedings of the 6th international symposium (is-shanghai 2008), shanghai, china, 10-12 april 2008.
3. Te-Fu Chiu, Chi-Tso Chang. Evaluation and Remediation Measures For Shield Tunnels Under Soil Liquefaction.
4. Liao, S.M., Peng, F.L., Shen, S.L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction. Tunnelling and Underground Space Technology 23 (2008) 421-430.
5. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J.I-C.. Seismic design and analysis of underground structure. Tunn. Undergr. Sp.Technol. 16, 2001, 247-293.
6. Wang, J. Seismic design of tunnels. Monograph 7, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc, New York, June 1993.

### Mai Duc Minh

Moscow state university of railway engineering, Moscow

Post-graduate student of the department «Underground structures»

E-mail: usd.miit@gmail.com; maiducminh\_hn@yahoo.com.vn

ПЛОТНИКОВ В.В., КОПАЧЕВА М.В.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТЫКОВ КОНСТРУКЦИЙ И МОНТАЖНОЙ ОСНАСТКИ В СИСТЕМЕ БЕЗРИГЕЛЬНОГО КАРКАСА С ЦЕЛЬЮ УСКОРЕНИЯ ЕГО ВОЗВЕДЕНИЯ

*В статье представлены результаты исследований по влиянию конструктивных решений стыков железобетонных конструкций и специальной оснастки на скорость и качество выполнения монтажных процессов при возведении зданий с безригельным каркасом.*

**Ключевые слова:** безригельный каркас, стыки сборных железобетонных конструкций, технология строительного производства, монтажная оснастка, монтажные процессы, скорость возведения зданий.

В настоящее время при строительстве общественных и жилых зданий высотой до 25 этажей широкое распространение получила архитектурно-строительная система с безригельным каркасом: Каркас Унифицированный Безригельный «КУБ». Основным отличием данной системы является использование индустриально изготовленных элементов каркаса здания в виде колонн и плит перекрытия и монтаж их на строительной площадке. Серия предназначена для строительства зданий в 4-х климатических зонах сейсмостойкостью до 9 баллов включительно. Начиная с 1967 года, когда было построено первое здание во Владивостоке (гостиница «Океан») по данной технологии, за годы своего существования система завоевала заслуженную популярность среди строителей, и это объясняется ее несомненными достоинствами перед другими технологиями. Суть системы в том, что ее создатели предложили новую конструкцию узла соединения перекрытия с колонной. Здесь впервые была учтена работа поперечной арматуры, которая была завязана в арматурный каркас особой конструкции, играющей роль встроеной в плиту капители и обеспечивающей работу узла на продавливание. Каркас в системе собирается на строительной площадке из изделий заводского изготовления с последующим замоноличиванием узлов. Здания на основе безригельного каркаса обладают рядом достоинств, основными из которых являются:

- возможность быстрой организации строительства при небольших капиталовложениях;
- универсальность, т.е. возможность применения системы в районах с любыми условиями строительства и для зданий любого назначения, от возведения жилых, общественных и административных до культурно-зрелищных и промышленных;
- экономичность, т.е. сравнительно небольшой расход стали и бетона, отсутствие массивных несущих стен и возможность использования легких ограждающих конструкций обуславливает снижение стоимости  $1 \text{ м}^2$  общей площади на 20-25% по сравнению с существующими системами;
- отсутствие внутренних несущих стен позволяет применять свободную планировку квартиры даже в процессе ее эксплуатации, что делает дом практически морально не стареющим;
- архитектурная выразительность и многообразие решений фасадов за счет возможности образования консольных перекрытий по периметру здания;
- возможность проектирования объектов любой высоты помещения и этажности – до 25 этажей;
- проекты зданий отвечают всем требованиям по энергосбережению.

При всех достоинствах безригельной системы в ней имеются недостатки, требующие детального анализа и серьезной проработки. В девяностые годы прошлого столетия была разработана более совершенная система КУБ-2,5, которая в начале этого столетия стала пользоваться большой популярностью. Модернизация основных конструктивных решений системы КУБ-2,5 заключалась в следующем: стыки панелей перекрытий, стыки неразрезных многорядных колонн, узлы соединения панелей перекрытия с колоннами, образующие рамные уз-

лы, решения связей, шпренгельные конструкции 12-метровых пролетов и др. – надежно обеспечивают рамные или рамно-связевые конструктивные системы каркасов зданий. Это стало возможным благодаря анализу результатов испытаний натуральных фрагментов стыков элементов системы, проведенных лабораторией динамических испытаний ЦНИИЭП жилища под руководством к.т.н. Ашкинадзе Г.Н. совместно с авторами систем. В технологическом отношении изготовление и монтаж системы КУБ-2,5 практически не отличался от других систем серии КУБ, поэтому переход предприятий, реализующих КУБ, на новую систему мог проходить без остановки производства с постепенной заменой оснастки. Разработанные в системе КУБ-2,5 принципиально новые конструкции стыков колонн, панелей перекрытия с колоннами и панелей перекрытия между собой не требуют установки опалубки и значительно сокращают (на 60%) объем бетона замоноличивания при монтаже. Кроме того, конструкция стыков колонн предполагает в большинстве случаев исключение сварки арматуры (при отсутствии растягивающих усилий в стыке). Все это способствует снижению трудозатрат при возведении каркаса до 50-60%. Система КУБ-2,5 предусматривает использование укрупненных изделий панелей перекрытия с максимальными размерами 2960×5980×160 мм, наряду с одномодульными панелями с максимальными размерами 2980×2980×100 мм – в зависимости от подъемно-транспортных возможностей подрядчиков. Укрупненный вариант является предпочтительным. В системе разработана новая конструкция узлов крепления связей к колоннам, снижающая вероятность резонанса сооружения при вынужденных колебаниях (сейсмика, ветер и др.). Наличие по существу 2-х основных несущих элементов системы, обеспечивающих ее прочностные качества – колонны и плиты перекрытия – предполагают остальные элементы здания навесными, что дает возможность максимального использования для ограждающих конструкций десятки конструктивных решений облегченных многослойных стен.

Разработчики системы КУБ-2,5 сделали стык с расстоянием между плитами в верхней части 100 мм, а в нижней части вдоль всего ребра пропустили полочку, которая служит опалубкой при замоноличивании стыка бетоном (рис. 1). Расстояние между смежными плитами в нижней части составили 20 мм (рис. 2).

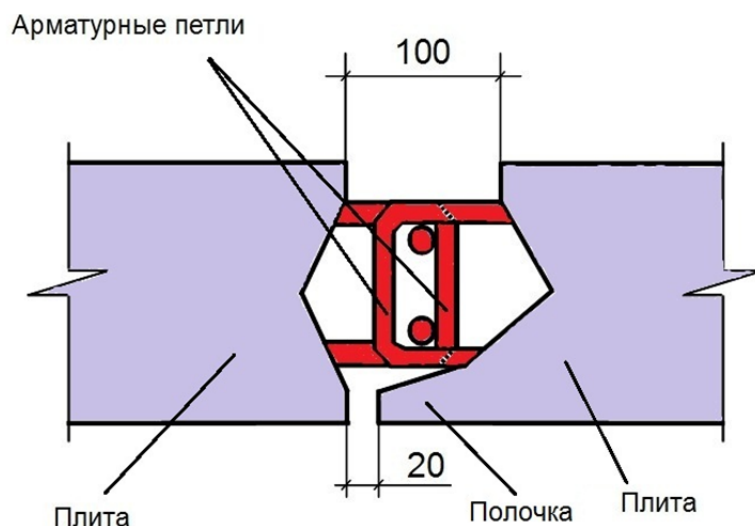


Рисунок 1 – Общий вид стыка плит перекрытия в системе КУБ-2,5

В процессе монтажа расстояние между всеми смежными плитами в 20 мм практически нигде не выдерживалось, в результате плиты в одном месте «наезжали» друг на друга, в другом «разбегались» и приходилось в одном месте рубить бетон, в другом устанавливать опалубку. Причина не состыковки была в том, что практически невозможно установить надколонную плиту строго в проектное положение. Разработанный узел стыка плиты с колонной, где обечайка надколонной плиты имеет свободное расстояние в 30 мм до рабочей арматуры с каждой стороны колонны, давала возможность плите перемещаться на это расстояние и поворачиваться в горизонтальном направлении (рис. 3).

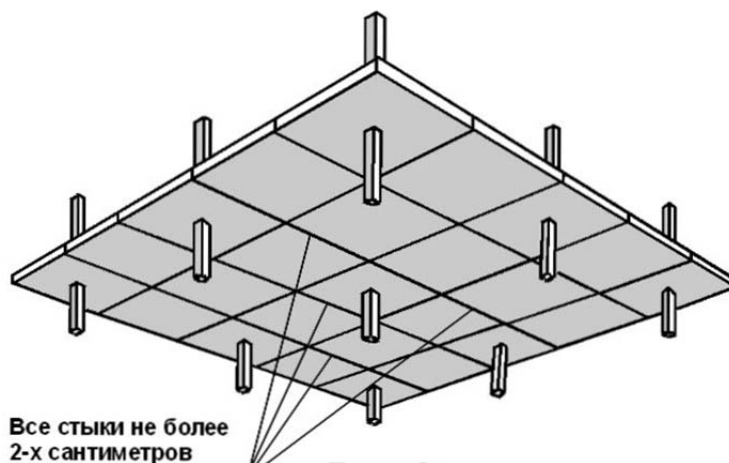


Рисунок 2 – Общий вид плит перекрытия в системе КУБ-2,5 снизу.  
 Расстояние между смежными плитами в нижней части составляют 20 мм

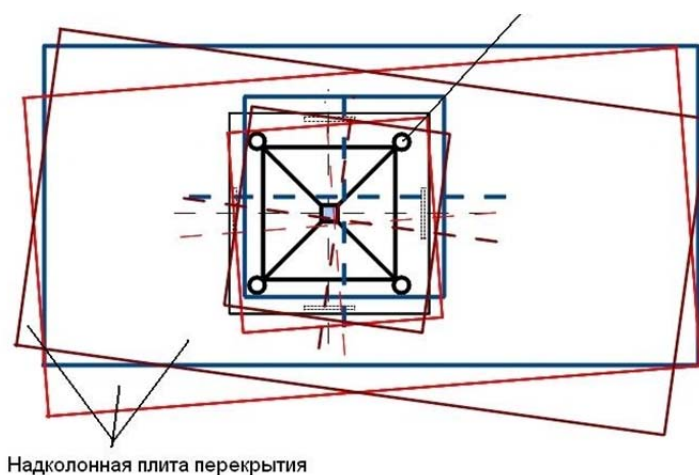
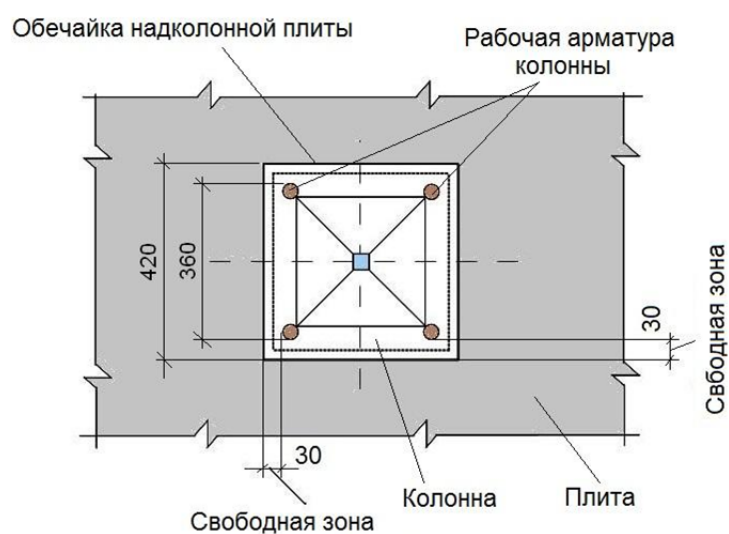


Рисунок 3 – Смещение в горизонтальном направлении плит перекрытия в системе КУБ-2,5 в процессе монтажа из-за свободного расстояния обечайки надколонной плиты в 30 мм до рабочей арматуры с каждой стороны колонны

По технологии в системах КУБ-2,5 и КБК центровка надколонной плиты выполняется с помощью лома, для этого надо забраться на панель и сверху «на глазок» выполнить центровку отверстия надколонной плиты относительно колонны (рис. 4).

Разработчики системы КУБ – 3V предложили центровку надколонной плиты выполнять с помощью предварительно установленного кондуктора и сборного опорного столика, что позволяет значительно повысить точность и скорость монтажа плит перекрытия (рис. 5).



*Рисунок 4 – Процесс центровки отверстия надколонной плиты относительно колонны в системах КУБ-2,5 и КБК, выполняемый с помощью лома*



*Рисунок 5 – Принудительный монтаж надколонной плиты с использованием кондуктора и опорного столика*

Другая проблема заключается в выравнивании смежных плит по горизонту. По торцам плит в строительных системах КУБ-2,5 и КБК устроены опорные столики (прямой и обратный), которые служат при монтаже для опирания плит друг на друга и для выверки горизонта смежных плит для устройства ровного потолка (рис. 6).

В конструкцию опорных столиков изначально заложен перепад в 5 мм (при смещении плит перепад увеличивается), для выравнивания рекомендовано подкладывать между опорными столиками плоские прокладки (маячки). Практически (в системах КУБ-2,5 и КБК) это выглядит так: при монтаже смежная плита опускается на опорные столики, для подстраховки устанавливаются монтажные стойки, нижняя часть плиты осматривается и определяется ориентировочно необходимый размер подкладки (маячка) для выравнивания низа плиты, затем плита поднимается, устанавливаются подкладки между опорными столиками и плита опуска-



ется, повторно выводятся монтажные стойки под плиту, далее вся процедура повторяется до достижения необходимого результата (ровного потолка).

В строительной системе КУБ-3V смежные плиты опираются на опорные стойки, которые устанавливаются непосредственно под стыками смежных плит, в результате исключается перепад стыкуемых плит и потолок имеет ровную поверхность (рис. 7). При этом на торцах смежных плит отсутствуют прямые и обратные опорные столики, что позволяет пропускать в просвет петель, расположенных вдоль торцов смежных панелей, цельные арматурные стержни и замоноличивать стык сплошным слоем бетона, а не дискретно (кусками) как это было в системе КУБ-2,5 (рис. 8).

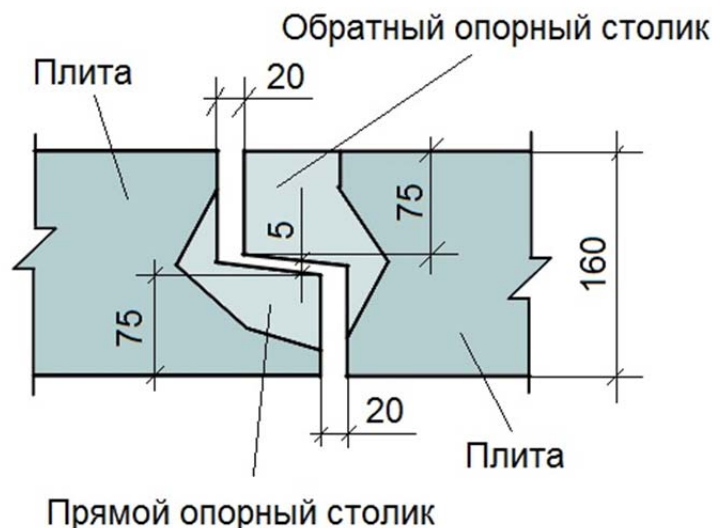


Рисунок 6 – Общий вид опорных столиков, расположенных по торцам плит и служащих для опирания плит друг на друга при монтаже

На сегодняшний день наряду с вышеуказанными предлагаются и другие варианты соединения плит перекрытий в каркасных безригельных зданиях.

Предлагаемое нами соединение плит перекрытия каркасного безригельного здания содержит плиты с арматурой внутри них со шпоночными пазами, торцы которых выполнены такими, что в соединениях образуется ниша, профиль которой в сечении симметричен относительно плоскости разреза плит и обеспечивает возможность расположения в ней выпусков плит. Это решение отличается тем, что выпуски плит выполнены на одной стороне стыкуемой плиты в виде крюкообразной формы, а на другой стороне стыкуемой плиты на конце выпуска заранее приваривается арматурный стержень. При свободном монтаже стержень устанавливается и приваривается на крюкообразную форму выпуска плиты, причем на стороне, где расположены выпуски в виде крюкообразной формы, плита имеет гребни, а где расположены выпуски с приваренным стержнем – плита имеет пазы. Сущность конструктивного решения представлено на рисунке 9.

Плиты изготавливаются на заводе с помощью унифицированной опалубки. Стыкуемые плиты имеют гребни 1 на одной стороне и пазы 2 на другой. На стороне, имеющей гребни 1, расположены в два ряда выпуски в виде крюкообразной формы (3). На стороне плиты, имеющей пазы 2, располагаются выпуски 4 с приваренными арматурными стержнями 5 на конце, также расположенные в два ряда. На поверхности гребней 1 и пазов 2 выпуски отсутствуют.

Монтаж предлагаемого соединения производится в следующей последовательности. При монтаже плит гребни 1 совмещаются с пазами 2, выпуски 4 с приваренными арматурными стержнями 5 на конце совмещаются с выпусками плит в виде крюкообразной формы 3 и, после выверки положения плиты, соединяются при помощи сварки. Затем стык замоноличивается бетоном.

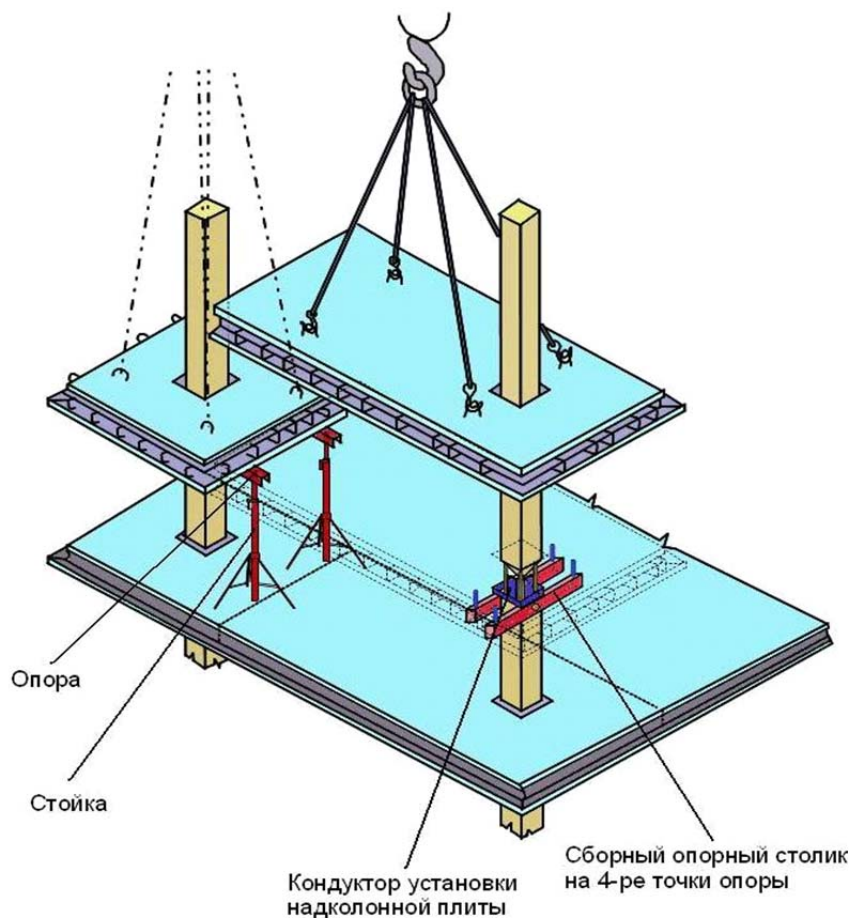


Рисунок 7 – Схема монтажа плит перекрытия в строительной системе КУБ-3V

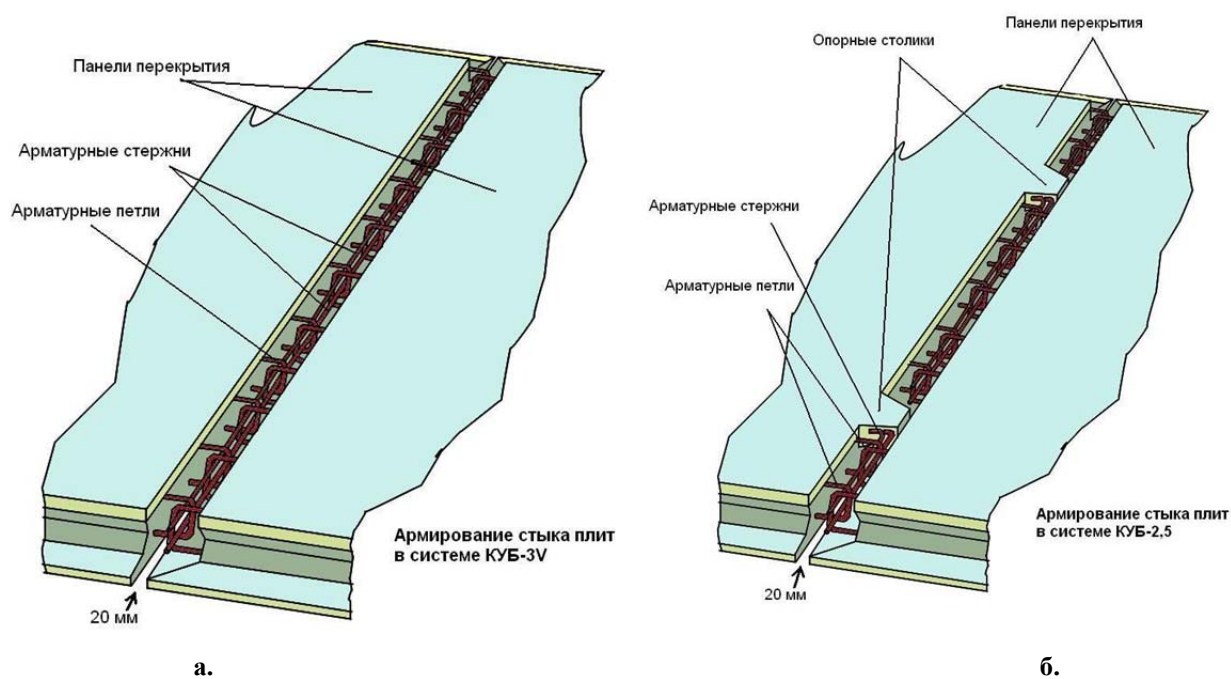


Рисунок 8 – Общий вид стыка плит перекрытия в системе КУБ-3V, при котором на торцах смежных плит отсутствуют прямые и обратные опорные столики (а) в отличие от системы КУБ-2,5, где предусмотрены прямые и обратные столики (б)



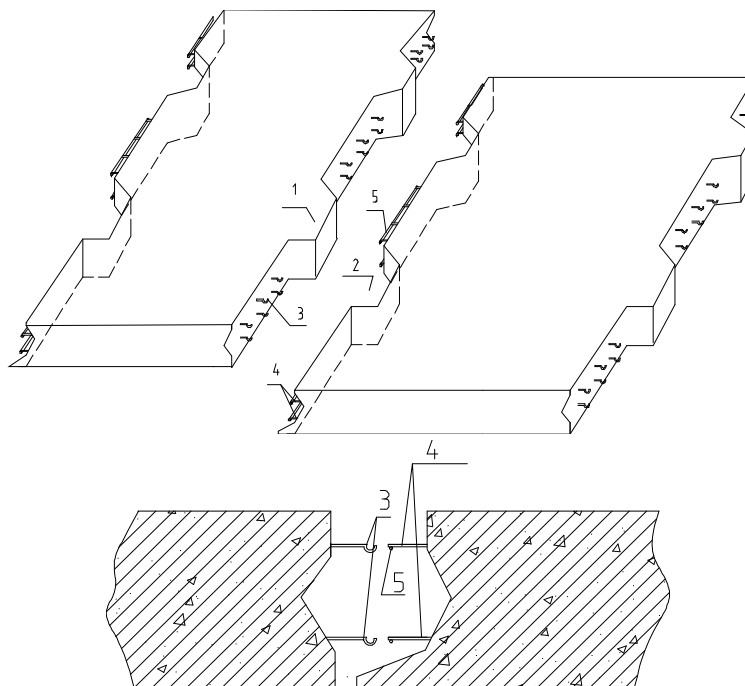


Рисунок 9 – Предлагаемое решение соединения плит перекрытия безригельного каркасного здания

### Заключение

Для ускорения и повышения качества монтажа конструкций каркасных зданий, в том числе и безригельных, необходимо совершенствовать стыки сборных конструкций наряду с разработкой специальной монтажной оснастки. Разработанное конструктивное решение соединения плит перекрытия при монтаже безригельного каркаса повышает технологичность монтажа, точность установки и прочность соединения элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 135672 РФ. Соединение плит перекрытия в каркасном безригельном здании // М.В. Копачева, В.В. Плотников. – МПК E04B5/43, E04B1/61, БГИТА. – опубл. 20.12.2013.
2. Плотников, В.В. Совершенствование стыка плит перекрытий в системе безригельного каркаса [Текст] / В.В. Плотников, М.В. Копачева // Материалы международной научно-практической конференции «Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда городов центральной России, Украины и Беларуси». – Брянск, 2014. – 400 с.

#### Плотников Валерий Викторович

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство»  
E-mail: plotn57@mail.ru

#### Копачева Марина Виталиевна

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск  
Студентка 5 курса строительного факультета специальности «Промышленное и гражданское строительство»  
E-mail: komser83@yandex.ru

V. PLOTNIKOV, M. KOPACHEVA

### PERFECTION OF THE CONSTRUCTION JOINTS IN THE UNGIRDER FRAME TO ACCELERATE INSTALLATION WORKS

*The article presents the results of researches on influence of constructive solutions junctions on speed and quality of the installation process for buildings with ungirder framed.*

**Keywords:** *ungirder framed, junction of precast ferroconcrete construction, technologies of construction production, installation process, speed of buildings construction.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Pat. № 135672 RF. Soedinenie plit perekrytija v karkasnom bezrigel'nom zdanii // M.V. Kopacheva, V.V. Plotnikov. – MPK E04V5/43, E04V1/61, BGITA. – opubl. 20.12.2013.
2. Plotnikov, V.V. Sovershenstvovanie styka plit perekrytij v sisteme bezrigel'nogo karkasa [Tekst] / V.V. Plotnikov, M.V. Kopacheva // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Arhitektura, gradostroitel'stvo, istoriko-kul'turnaja i jekologicheskaja sreda gorodov central'noj Rossii, Ukrainy i Bela-rusi. – Brjansk, 2014. – 400 s.

### **V. Plotnikov**

Bryansk state engineering-technological akademy, Bryansk  
Doctor of technical science, professor, head of the department «Building manufacturing»  
E-mail: plotn57@mail.ru

### **M. Kopacheva**

Bryansk state engineering-technological akademy, Bryansk  
5th year student of construction department specialty «Industrial and civil construction»  
E-mail:komser83@yandex.ru

СИДОРОВ А.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ КРУЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ФОРМЫ

В статье приводится аналитическое решение задачи определения геометрической жесткости кручения тонкостенной трубы прямоугольного сечения с использованием метода интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ). Полученный результат весьма близок к точному решению, поэтому проводится тестирование этого метода с целью оценки погрешности получаемых с его помощью решений. Для построения изопериметрических прямоугольников использовано преобразование квадрата в прямоугольник с сохранением площади сечения.

**Ключевые слова:** кручение стержней, геометрическая жесткость кручения, труба с замкнутым прямоугольным сечением, коэффициент формы, метод интерполяции по коэффициенту формы.

В строительной механике известны различные приближенные методы расчета призматических тонкостенных стержней на кручение. Среди них следует отметить работы Л.В. Канторовича, Л.М. Мительмана, Л.С. Лейбензона, Н.Х. Арутюняна [1..4], в которых приводятся различные приближенные формулы для определения жесткости кручения стержня.

Рассмотрим известное решение задачи о кручении двусвязного тонкостенного призматического стержня произвольной формы, полученное Н.Х. Арутюняном [4], в котором геометрическая жесткость сечения  $I_k$  определяется по формуле:

$$I_k = 4 A_0^2 \int_{L_0} \frac{ds}{\delta} \quad (1)$$

где  $A_0$  – площадь фигуры, ограниченной замкнутой линией  $L_0$ , проведенной посередине стенки сечения;  $\delta$  – толщина стенки трубы;  $ds$  – элементарный участок контура. Для двусвязных областей с одинаковой толщиной стенки ( $\delta = \text{const}$ ) (рис. 1) это уравнение принимает более простой вид:

$$I_k = 4 A_0^2 \delta / L_0 \quad (2)$$

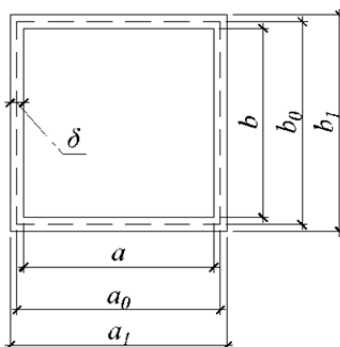


Рисунок 1 – Труба в виде прямоугольника

Преобразуем выражение (2) следующим образом:

$$I_k = \frac{4 A_0^2 \delta}{L_0} = \frac{4 A_0^2 \delta}{L_0} \frac{L_0^3}{L_0^3} \frac{\delta}{\delta} = \frac{L_0}{\delta} \frac{4 A_0^2}{L_0^4} L_0^2 \delta^2 = \frac{L_0}{\delta} \frac{4 A_0^2}{L_0^4} A^2,$$

где  $A = L_0 \delta$  – площадь поперечного сечения двусвязной области. С учетом этого соотношения приведенная геометрическая жесткость кручения  $i_k = I_k / A^2$  будет определяться по формуле:

$$i_k = \frac{L_0}{\delta} \frac{4A_0^2}{L_0^4}. \quad (3)$$

Рассмотрим геометрическое преобразование сечения трубы (рис. 2), при котором квадрат обращается в прямоугольник с сохранением условия  $L_0 = const$ . При таком преобразовании если  $\delta = const$ , то и  $A = const$ , и  $A_0 = const$ .

Преобразуем выражение (3) с выделением коэффициента формы\*. Как известно [6], коэффициент формы для прямоугольника определяется по формуле:

$$K_f = 4 \left( \frac{a_0}{b_0} + \frac{b_0}{a_0} \right). \quad (4)$$

После проведения необходимых преобразований в выражении (4) получим:

$$\begin{aligned} K_f &= 4 \cdot \left( \frac{a_0}{b_0} + \frac{b_0}{a_0} \right) = 4 \cdot \left( \frac{a_0^2 + b_0^2}{a_0 \cdot b_0} \right) = 4 \cdot \left( \frac{4a_0^2 + 4b_0^2 + 8a_0b_0 - 8a_0b_0}{4a_0b_0} \right) = \\ &= 4 \cdot \left( \frac{[2a_0 + 2b_0]^2}{4a_0b_0} - 2 \right) = \frac{(2a_0 + 2b_0)^2}{a_0b_0} - 8 = \frac{L_0^2}{A_0} - 8. \end{aligned} \quad (5)$$

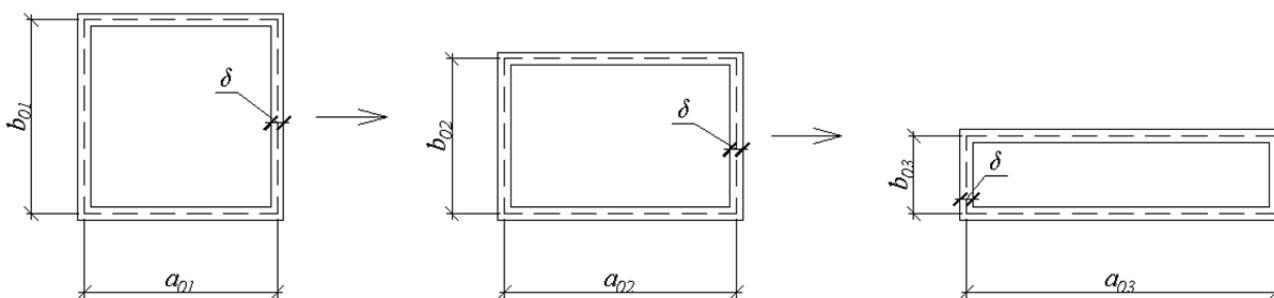


Рисунок 2 – Геометрическое преобразование сечения квадратной трубы в прямоугольную при соблюдении условия  $L_0 = const$ ,  $A_0 = const$  и  $A = const$

Выразив величину  $L_0^2/A_0$  из формулы (5) и подставив ее в формулу (3), получим:

$$i_k = 4 \frac{L_0}{\delta} \left( \frac{A_0}{L_0^2} \right)^2 = \frac{L_0}{\delta} \frac{4}{(K_f + 8)^2}. \quad (6)$$

График зависимости (6) представлен на рисунке 3, а результаты расчета по ней – в таблице 1.

Таблица 1 – Значение приведенной геометрической жесткости при аффинном растяжении сечения в виде тонкостенной двусвязной прямоугольной области

$a_0/b_0$	$a_0$ , мм	$b_0$ , мм	$L_0$ , мм	$A_0$ , мм <sup>2</sup>	$i_k$
1:1	75	75	300	5625	4,688
1,5:1	60	90	300	5400	4,32
2:1	50	100	300	5000	3,704
3:1	37,5	112,5	300	4218,75	2,637
4:1	30	120	300	3600	1,92

Примечание – При проведении расчетов было принято  $\delta = 1$  мм.

\* Подробные сведения о коэффициенте формы и методе интерполяции по коэффициенту формы приводятся в работах [5, 6].

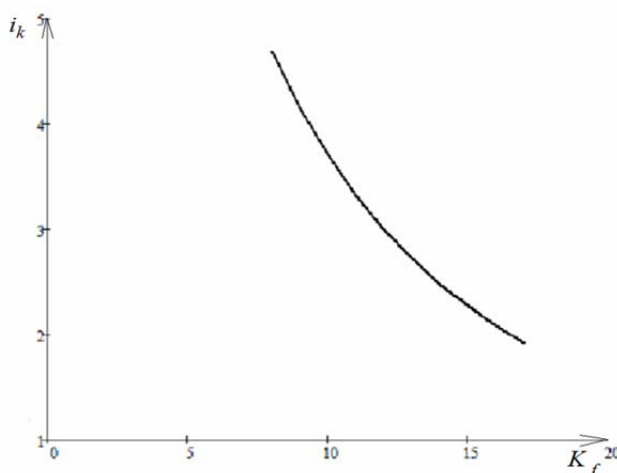


Рисунок 3 – Зависимость  $i_k - K_f$

Поскольку формула (6) для тонкостенных труб прямоугольного сечения дает практически точный результат, целесообразно протестировать метод интерполяции по коэффициенту формы на сечениях рассматриваемого вида с целью оценки погрешности этого метода.

Суть этого метода заключается в следующем [6]. Предположим, необходимо записать решение для некоторого множества фигур, полученных путем какого-либо (непрерывного или дискретного) геометрического преобразования. При анализе фигур этого множества следует выделить среди них хотя бы две фигуры, решения для которых известны («опорные» решения). Желательно, чтобы эти решения при выбранном геометрическом преобразовании отстояли друг от друга на «небольшом расстоянии».

Воспользуемся степенной интерполяцией, подробно исследованной в работе [6]. Для рассматриваемой задачи  $i_k = K(K_f)^n$ . В качестве опорных фигур возьмем квадрат ( $K_{f1} = 8, i_{k1} = 4,688$ ) и прямоугольник с отношением сторон  $a_0/b_0 = 4:1$  ( $K_{f1} = 17, i_{k2} = 1,920$ ). Используя данные для опорных сечений, получим:

$$n = \ln(i_{k2}/i_{k1})/\ln(K_{f2}/K_{f1}) = \ln(1,920/4,688)/\ln(17/8) = -1,184, \quad (7)$$

$$i_k = i_{k1} \cdot \left(\frac{K_f}{K_{f1}}\right)^n = 4,688 \cdot \left(\frac{K_f}{8}\right)^{-1,184} = 54,985(K_f)^{-1,184}. \quad (8)$$

Если за вторую опорную фигуру выбрать прямоугольник, у которого  $a_0/b_0 = 3:1$  и  $i_{k2} = 2,637$ , то

$$i_k^n = 48,740(K_f)^{-1,126}. \quad (9)$$

Сопоставление решений, полученных по формулам (3), (8) и (9), приведены в таблице 2.

Таблица 3 – Оценка погрешности решений, полученных с помощью МИКФ

№ п/п	$a_0/b_0$	$K_f$	$i_k, (3)$	$i_k, (8)$	$\Delta, \%$	$i_k, (9)$	$\Delta, \%$
1	1:1	8	4,688	4,688	0	4,688	0
2	1:1,5	8,667	4,320	4,264	1,30	4,284	0,83
3	1:2	10	3,704	3,600	2,81	3,647	1,54
4	1:3	13,333	2,637	2,561	2,88	2,638	0,04
5	1:4	17	1,920	1,920	0	2,006	4,47

Анализ результатов, приведенных в таблице 2, показывает, что при  $a_0/b_0 < 3$  решения, полученные с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы, имеют вполне удовлетворительную точность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Канторович, Л.В. О применении одного метода приближенного решения уравнений в частных производных к задаче о кручении призматических стержней [Текст] / Л.В. Канторович, П.В. Фрумкин // Труды Ленингр. ин-та инж. промышленного строительства, в. 4 т. – Л: 1937.
2. Мительман, Л.М. Решение задачи кручения методом последовательного приближения к контуру [Текст] / Л.М. Мительман // Труды МАИ, 1955. – №47.
3. Лейбензон, Л.С. Вариационные методы решения задач теории упругости [Текст] / Л.С. Лейбензон. – М.: Гостехиздат, 1943.
4. Арутюнян, С.Х. Кручение упругих тел [Текст] / С.Х. Арутюнян, В.Л. Абрамян. – М.: Физматгиз, 1964.
5. Поля, Г., Сега, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике [Текст] / Г. Поля, Г. Сега. – М.: Госматиздат, 1962. – 326 с.
6. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 304 с.

**Сидоров Алексей Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел

Старший преподаватель кафедры «Агропромышленное и гражданское строительство»

E-mail: Sidorovavorel@gmail.com

A. SIDOROV

**TASK SOLUTION OF THE ROTATION BARS WITH  
A CROSS SECTION IN RECTANGLE THIN-WALLED CLOSED  
AREA USING THE INTERPOLATION METHOD  
BY THE FORM FACTOR**

*The article deals with the solution of the torsion bars with a cross section in the form of a doubly-connected thin-walled closed area as a rectangle using the interpolation method by the form factor (MIKF). The interpolation methods by the form factor of 2nd and 3rd solutions is a treat. Estimated error of the calculation methods and the applicability MIKF to problems of this kind.*

**Keywords:** bars rotation, the interpolation method by the form factor, approximating function, doubly-connected area.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kantorovich, L.V. O primenenii odnogo metoda priblizhennogo reshenija uravnenij v chastnyh proiz-vodnyh k zadache o kruchenii prizmaticheskikh sterzhnej [Tekst] / L.V. Kantorovich, P.V. Frumkin // Trudy Le-ningr. in-ta inzh. promyshlennogo stroitel'stva, v. 4 t. – L: 1937.
2. Mitel'man, L.M. Reshenie zadachi kruchenija metodom posledovatel'nogo priblizhenija k konturu [Tekst] / L.M. Mitel'man // Trudy MAI, 1955. – №47.
3. Lejbenzon, L.S. Variacionnye metody reshenija zadach teorii uprugosti [Tekst] / L.S. Lejbenzon. – М.: Gostehizdat, 1943.
4. Arutjunjan, S.H. Kruchenie uprugih tel [Tekst] / S.H. Arutjunjan, V.L. Abramjan. – М.: Fizmatgiz, 1964.
5. Polia, G., Sege, G. Izoperimetricheskie neravenstva v matematicheskoj fizike [Tekst] / G. Polia, G. Sege. – М.: Gosmatizdat, 1962. – 326 s.
6. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – М.: ASV, 1999. – 304 s.

**A. Sidorov**

Orel state agrarian university, Orel

Apper teacher of department «Agroindustrial ana sivil construction»

E-mail: Sidorovavorel@gmail.com

ЧЕРНЯЕВ А.А., ПРОКУРОВ М.Ю., ШЛЯХОВ С.В.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ АНАЛОГИ В ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

*Приводится доказательство функциональной связи между интегральными физико-механическими характеристиками в двумерных задачах строительной механики и теории упругости (максимальный прогиб пластинок и мембран, основная частота колебаний пластинок и мембран, критическое усилие пластинок, крутильная жесткость призматического бруса) с отношением внутреннего конформного радиуса плоской области к внешнему. Показано, что это отношение является геометрическим аналогом рассматриваемых интегральных физико-механических характеристик. Отмечаются перспективы и преимущества его использования по сравнению с известным аналогом – коэффициентом формы плоской области.*

**Ключевые слова:** конформные радиусы односвязной плоской области, пластинки, мембраны, призматический брус, максимальный прогиб, основная частота колебаний, критическое усилие, крутильная жесткость.

**Введение.** Двумерные задачи строительной механики (технической теории пластинок) и теории упругости сводятся к решению краевых задач для одного или нескольких дифференциальных уравнений с двумя переменными. Нахождение точных решений этих уравнений возможно лишь в ряде частных случаев, наиболее элементарных, во всех остальных же случаях используют приближенные методы, в основном численные. Однако численные методы обладают известными недостатками, заключающимися в значительной трудоемкости осуществления качественной оценки полученного результата и невозможности отследить поведение искомых решений, при изменении геометрических параметров и форм пластинок, мембран и сечений.

В тех случаях, когда необходимо оперативно получить оценку некоторой интегральной физико-механической характеристики (максимальный прогиб пластинок и мембран, основная частота колебаний пластинок и мембран, критическое усилие пластинок, крутильная жесткость призматического бруса и др.) или не требуется высокая точность решения, что особенно актуально на начальной стадии проектирования, часто применяют геометрические методы. Такие методы позволяют избежать решения сложных дифференциальных уравнений, не требуют мощных ЭВМ и сводятся к геометрическому моделированию формы плоской области (пластинки, мембраны, сечения). При этом выбирается, геометрическая характеристика формы области, выступающая в роли основного аргумента, по которому оцениваются искомые решения.

Среди геометрических методов следует отметить изопериметрический метод (ИЗПМ), примененный впервые всемирно известными математиками Г. Полия и Г. Сеге [1] для решения некоторых задач математической физики, а для решения двумерных задач строительной механики и теории упругости профессором В.И. Коробко [2]. Более перспективным является метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) [3], разработанный А.В. Коробко, являющийся логическим развитием ИЗПМ. В этих методах в качестве геометрического аргумента для определения интегральных физико-механических характеристик используется интегральная характеристика формы плоской области – коэффициент формы  $K_f$ . Подробно с этой характеристикой можно познакомиться в работах [2, 3].

В настоящей статье для решения задач технической теории пластинок и некоторых двумерных задач теории упругости предлагается использовать новый геометрический аргумент в виде отношения внутреннего к внешнему конформных радиусов  $\bar{r}/\bar{r}$ .

Конформные радиусы по отдельности широко используются при решении многих прикладных задач математической физики, гидро- и аэродинамики, магнитогидродинамики и др. [1, 4], а как отношение впервые было использовано в теории пластинок В.И. Коробко и

А.Н. Хусточкиным в 1994 году при исследовании задач устойчивости [5].

**Некоторые общие сведения.** Отображение одной фигуры (области) на другую, при котором две любые кривые, пересекающиеся под некоторым углом во внутренней точке первой фигуры, преобразуются в кривые второй фигуры, пересекающиеся под тем же углом, называется конформным [4].

Если конформное отображение области  $D$  осуществляется на внутренность некоторой окружности в плоскости  $\omega$ , то произвольная точка  $a$ , принадлежащая области  $D$ , переходит в центр этой окружности, которая характеризуется внутренним конформным радиусом  $r_a$ . При определенном выборе точки  $a$  внутренний радиус  $r_a$  достигаем своего максимального значения. В дальнейшем будем использовать именно максимальный внутренний радиус, который в математической физике принято обозначать символом  $\dot{r}$ .

Если в односвязной области  $D$  взять бесконечно удаленную точку  $z = \infty$ , то эту область следует отображать конформно и однолистно на внешнюю область некоторой окружности в плоскости  $\omega$  так, что бесконечно удаленная точка переходит сама в себя и модуль производной отображающей функции в точке  $z = \infty$  равен единице. Радиус этой окружности называется внешним радиусом области  $D$  и длина его обозначается символом  $\bar{r}$ .

Существуют однозначно определенные функции, осуществляющие эти отображения:

$$\omega = f(z) = u(x, y) + iv(x, y), \quad (1)$$

где  $\omega, z$  – комплексные переменные (точки комплексной плоскости);  $x, y$  – действительные числа;  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

В научной и справочной литературе по теории конформного отображения приводятся формулы для нахождения внутреннего  $\dot{r}$  и внешнего  $\bar{r}$  конформных радиусов для ряда односвязных областей с выпуклым контуром [1, 4]. К примеру, для некоторых областей они имеют вид:

– для круга радиуса  $a$ :

$$\dot{r} = a, \quad \bar{r} = a; \quad (2)$$

– для правильных  $n$ -угольников:

$$\dot{r} = \frac{\Gamma(1-1/n)}{2^{1-\frac{2}{n}} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)} L, \quad \bar{r} = \frac{\Gamma(1+1/n)}{2^{1+\frac{2}{n}} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{n}\right)} L, \quad (3)$$

где  $n$  – число сторон;  $L$  – периметр;  $\Gamma(x)$  –  $\Gamma$ -функция (Гамма-функция) и т.п.

**Двумерные задачи строительной механики и теории упругости, решаемые геометрическими методами.** Рассмотрим известные дифференциальные уравнения двумерных задач строительной механики пластинок и теории упругости, сгруппированные по признаку общности структуры:

– группа дифференциальных уравнений эллиптического типа четвертого порядка, включающая задачи поперечного изгиба, свободных колебаний и устойчивости пластинок;

– группа дифференциальных уравнений эллиптического типа второго порядка (уравнения Пуассона), включающая задачи поперечного изгиба растянутых мембран, свободных колебаний мембран и задачу кручения упругого призматического бруса:

$$\begin{cases} D\Delta^2 \Delta^2 w - q = 0, & \begin{cases} \Delta^2 w + q/p = 0, \\ \Delta^2 w + \lambda^2 w = 0, \\ \Delta^2 w + 2 = 0, \end{cases} \\ D\Delta^2 \Delta^2 w - \beta^2 w = 0, & \\ D\Delta^2 \Delta^2 w - q_0 \Delta^2 w = 0, & \end{cases} \quad (4)$$

где  $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$  – цилиндрическая жесткость пластинки ( $E$  – модуль упругости материала первого рода;  $h$  – толщина пластинки;  $\nu$  – коэффициент Пуассона);  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\beta^2 = \omega_n^2 m/D$  – собственное значение дифференциального уравнения колебаний пластинок;  $\lambda^2 = \omega_m^2 m/p$  – собственные значения дифференциального уравнения колебаний мембран;  $w$  –



для пластинки и мембраны функция прогибов, для бруса – функция напряжений;  $q$  – интенсивность равномерно распределенной поперечной нагрузки на пластинку или мембрану;  $q_0$  – интенсивность усилия равномерного сжатия пластинки;  $p$  – интенсивность усилия равномерного растяжения мембраны;  $\omega_m$  – частота свободных колебаний мембраны;  $m$  – масса единицы площади пластинки или мембраны.

Представим функцию прогибов (и напряжений) в виде произведения максимального прогиба  $w_0$  на единичную функцию  $f(x, y)$ , удовлетворяющую условию  $1 \geq f(x, y) \geq 0$ :

$$w = w(x, y) = w_0 f(x, y). \quad (5)$$

Подставив ее в дифференциальные уравнения и проинтегрировав их по площади области  $A$  (площади пластинки, мембраны или поперечного сечения бруса) получим следующие выражения для определения соответствующих интегральных физико-механических характеристик в рассматриваемых задачах [2]:

$$\begin{cases} (w_0)_n = \frac{qA}{D} / \iint \Delta^2 \Delta^2 f dA, & (w_0)_m = -\frac{qA}{p} / \iint \Delta^2 f dA, \\ (\omega_0)_n^2 = \frac{D}{m} \iint \Delta^2 \Delta^2 f dA / \iint f dA, & (\omega_0)_m^2 = -\frac{p}{m} \iint \Delta^2 f dA / \iint f dA, \\ q_{0, кр} = D \iint \Delta^2 \Delta^2 f dA / \iint \Delta^2 f dA; & (w_0)_\sigma = -2A / \iint \Delta^2 f dA, \end{cases} \quad (6)$$

где  $(w_0)_n$  – максимальный прогиб пластинки;  $(\omega_0)_n$  – основная частота колебаний пластинки;  $q_{0, кр}$  – критическое усилие при потере устойчивости пластинки;  $(w_0)_m$  – максимальный прогиб мембраны;  $(\omega_0)_m$  – основная частота колебаний мембраны;  $(w_0)_\sigma$  – максимальное значение функций напряжений бруса.

**Физико-механическая и геометрическая аналогия в двумерных задачах строительной механики и теории упругости с конформными радиусами.** Приведем вывод функциональной зависимости критического усилия при потере устойчивости пластинок  $q_{0, кр}$  от величины отношения конформных радиусов, подсчитанных для областей ограниченных их контуром, полученный в работе [5]. В работе [1], с помощью вариационного представления собственного значения дифференциального уравнения свободных колебаний мембраны  $\lambda^2$  и конформного представления внутренности ее области при отображении на единичный круг, получено следующее неравенство:

$$\lambda^2 \leq \frac{j^2}{|c_1|^2 + \gamma_2 |c_2|^2 + \gamma_3 |c_3|^2 + \dots}, \quad (7)$$

где  $j = 2,4048\dots$  – первый положительный корень бесселевой функции  $J_{0(x)}$ ;  $c_k$  – коэффициенты разложения в степенной ряд функции, осуществляющей взаимнооднозначное конформное отображение области мембраны на единичный круг  $|\zeta| < 1$ ;

$$\omega = f(z) = c_0 + c_1 \zeta + c_2 \zeta^2 + c_3 \zeta^3 + \dots; \quad (8)$$

$\gamma_k$  – отношение интегралов, вычисляемых через квадраты бесселевых функций:

$$\gamma_k = k^2 \int_0^1 [J_0(j\rho)]^2 \rho^{2k-1} d\rho / \int_0^1 [J_0(j\rho)]^2 \rho d\rho, \quad (9)$$

где  $\rho = t/r(\varphi)$  – переменная функция прогибов  $f = g(\rho)$  с линиями уровня, подобными контуру мембраны;  $t = r(\varphi)$  – полярное уравнение контура мембраны. В выражении (7) равенство достигается для круглой мембраны. При  $k \rightarrow \infty$   $\lambda^2$  в этом выражении стремится к своему действительному значению. При этом скорость сходимости ряда в знаменателе существенно зависит от степени «правильности» (в смысле близости формы мембраны к круглой): чем «правильнее» форма мембраны тем быстрее сходится этот ряд.

С учетом известной мембранной аналогии, согласно которой собственное значение

дифференциального уравнения свободных колебаний мембраны  $\lambda^2$ , с точностью до размерного множителя, равно собственному значению дифференциального уравнения устойчивости пластинки полигональной формы с шарнирно опертым контуром  $\beta^2$  от действия усилия равномерного сжатия, форма которой совпадает с формой мембраны, неравенство (6) можно переписать применительно к задаче устойчивости пластинки [5]:

$$q_{0, \text{кр}} \leq \frac{j^2 D}{\dot{r}^2 \cdot \left(1 + \sum_1^k \gamma_k c_k^2\right)}, \quad (10)$$

где  $\dot{r}$  – внутренний конформный радиус области, равный модулю первого коэффициента разложения (7):  $\dot{r} = |c_1|$ . Выражение (10) позволяет находить значения критического усилия шарнирно опертых полигональных пластинок, равномерно сжатых по контуру, с высокой точностью при удержании большого числа членов (порядка 5...8) в разложениях (8). Определение коэффициентов  $c_i$  является крайне сложным и трудоемким процессом, в особенности для пластинок сложных форм, что существенно снижает эффективность использования выражения (10). Однако этот недостаток можно преодолеть.

Для правильных  $n$ -угольных, произвольных треугольных и ромбических областей справедливо равенство [1]:

$$A = \pi \dot{r} \bar{r}, \quad (11)$$

где  $A$  – площадь области;  $\dot{r}$  и  $\bar{r}$  – соответственно внутренний и внешний конформные радиусы областей. Преобразуя выражение (10) с учетом (11) [5]:

$$q_{0, \text{кр}} \leq \frac{kD}{\dot{r}^2 \cdot \left(1 + \sum_1^k \gamma_k c_k^2\right)} = \frac{\bar{r}}{\dot{r}} \cdot \frac{\pi k}{\left(1 + \sum_1^k \gamma_k c_k^2\right)} \cdot \frac{D}{A}, \quad (12)$$

где  $k$  – некоторая числовая константа, обращающая это выражение в равенство для круглых пластинок (в случае шарнирного опирания  $k = j^2 = 5,783$ , в случае жесткого защемления  $k = 14,790$ ). Неравенство (12) дает асимптотически точные значения. Удерживая в разложении отображающей функции лишь первый член ряда и записав для удобства дальнейшего анализа отношение конформных радиусов в обратном виде, получается менее строгое выражение [5]:

$$q_{0, \text{кр}} \leq \pi k \left(\frac{\dot{r}}{\bar{r}}\right)^{-1} \cdot \frac{D}{A}. \quad (13)$$

Выражение (13) устанавливает следующую закономерность в задаче устойчивости равномерно сжатых по контуру пластинок: *отношение конформных радиусов  $\dot{r}/\bar{r}$ , подсчитанное для области, ограниченной контуром пластинки, является единственным аргументом, определяющим величину критического усилия при потере устойчивости  $q_{0, \text{кр}}$  (цилиндрическую жесткость  $D$  и площадь  $A$  пластинки считаем заданными)*. Эта закономерность позволяет, не решая дифференциального уравнения продольного изгиба пластинок, а рассматривая лишь элементарную геометрическую задачу, связанную с анализом изменения отношения конформных радиусов  $\dot{r}/\bar{r}$ , оценивать и качественную, и количественную стороны рассматриваемой задачи.

Следует отметить, что выражение (13) является предпочтительней выражения (10), поскольку в нем имеется безразмерный параметр  $\dot{r}/\bar{r}$ , в то время как в (10) имеется размерная величина  $\dot{r}$ . При использовании формулы (13) необходимо анализировать лишь форму пластинки, а при использовании (10) требуется еще учитывать и масштаб пластинки.

Анализ результатов решения задач устойчивости пластинок численными методами показал, что их отклонения от решений, получаемых с помощью неравенства (13), носят монотонный характер и увеличиваются до 10...15% для весьма вытянутых пластинок. Причем эти отклонения пропорциональны отношению конформных радиусов. Поэтому в общем случае неравенство (13) можно представить в виде равенства:

$$q_{0, \text{кр}} = k_q \cdot \frac{D}{A}, \quad (14)$$

где  $k_q = f(\dot{r}/\bar{r})$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от граничных условий пластинки и ее формы, представляющий собой безразмерное значение критического усилия.

Ввиду математической аналогии уравнений (4) с учетом (6), (14) их можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{0,кр} = k_q \cdot \frac{D}{A}, \\ (w_0)_n = (k_w)_n \cdot \frac{qA^2}{D}, \\ (\omega_0)_n = (k_\omega)_n \cdot \frac{\sqrt{D/m}}{A}; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} (w_0)_m = (k_w)_m \cdot \frac{qA}{p}, \\ (\omega_0)_m = (k_\omega)_m \cdot \frac{p}{mA}, \\ (w_0)_\delta = k_\delta \cdot M, \end{array} \right. \quad (15)$$

где  $k_i = f_i(\dot{r}/\bar{r})$  – численные значения физико-механических характеристик, зависящие от граничных условий пластинки, мембраны или сечения бруса и их формы.

### Выводы

1. Для решения двумерных задач строительной механики (технической теории пластинок) и теории упругости, связанных с плоской областью и имеющей выпуклый контур, геометрическими методами предложен новый аргумент – отношение внутреннего конформного радиуса области к внешнему. Это отношение является геометрическим аналогом интегральных физико-механических характеристик в рассматриваемых задачах и аналогично коэффициенту формы.

2. Исследования [6, 7, 8] некоторых из рассматриваемых задач (2) показали, что область возможных значений интегральных физико-механических характеристик, представленных в координатных осях «интегральная физико-механическая характеристика – отношение конформных радиусов» оказалась весьма узкой, что позволило получать оценки и решения с использованием методик ИЗПМ и МИКФ с более высокой точностью, чем при использовании коэффициента формы. Кроме этого были установлены новые интересные закономерности в задачах технической теории пластинок с использованием отношения конформных радиусов [9, 10, 11], эти закономерности носят фундаментальный характер.

3. На основании аналогии рассматриваемых задач следует ожидать, что аналогичные результаты можно получить и в остальных задачах (2). Результаты этих исследований будут опубликованы в последующих работах авторов.

**Замечание.** Работа выполнена в рамках НИР, проводимой по гос. заданию Минобрнауки РФ на оказание услуг (выполнение работ) по теме «Разработка и развитие инженерных методов решения задач технической теории пластинок на основе принципов симметрии и геометрического моделирования их формы» (2012 – 2014 гг.), рег. № 7.587.2011.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полия, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике [Текст] / Г. Полия, Г. Сеге. – М.: КомКнига, 2006. – 336 с.
2. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода [Текст] / В.И. Коробко. – М.: АСВ, 1997. – 390 с.
3. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.
4. Иванов В.И. Конформные отображения и их приложения [Текст] / В.И. Иванов, В.Ю. Попов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 324 с.
5. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в задачах устойчивости пластинок [Текст] / В.И. Коробко, А.Н. Хусточкин. – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы, 1994. – 148 с.
6. Коробко, В.И. Решение задач поперечного изгиба пластинок с использованием конформных радиусов [Текст] / В.И. Коробко, А.А. Черняев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №6. – С. 16-22.
7. Korobko, A.V. Determination of maximum deflection in transverse bending of parallelogram plates using the

conformal radiuses ratio [Text] / A.V. Korobko, A.A. Chernyaev // Russian Aeronautics. – 2013. – Volume 56. – Issue 2. – Pp. 131-134.

8. Черняев, А.А. К вопросу о расчете трапециевидных пластинок из условия жесткости [Текст] / А.А. Черняев // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №1. – С. 37-42.

9. Черняев, А.А. К вопросу о расчете пластинок средней толщины из условия жесткости [Текст] / А.А. Черняев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С. 83-89.

10. Черняев, А.А. Динамический расчет правильных  $n$ -угольных, треугольных и ромбических шарнирно опертых пластинок с использованием отношения конформных радиусов в качестве геометрического аргумента [Текст] / А.А. Черняев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2012. – №2. – С. 63-71.

11. Черняев, А.А. Динамический расчет круглых, правильных  $n$ -угольных, треугольных и ромбических жестко защемленных пластинок с использованием отношения конформных радиусов в качестве геометрического аргумента [Текст] / А.А. Черняев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – №2. – С. 24-33.

**Черняев Андрей Александрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: chernyev87@yandex.ru

**Прокуров Максим Юрьевич**

ФГБОУ ВПО «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

**Шляхов Станислав Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Студент группы 41-С кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: shlyakhov.stas@mail.ru

---

A. CHERNYAEV, M. PROKUROV, S. SHLYAKHOV

**PHYSICOMECHANICAL AND GEOMETRICAL ANALOGUES  
IN TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS OF CONSTRUCTION MECHANICS  
AND ELASTICITY THEORIES**

*In article the proof of functional communication between integrated physicommechanical characteristics is provided in two-dimensional problems of construction mechanics and the elasticity theory (the maximum deflection of plates and membranes, the main frequency of fluctuations of plates and membranes, critical effort of plates, torsional rigidity of a prismatic bar) with the relation of internal conformal radius of flat area to the external. It is shown that this relation is geometrical analog of considered integrated physicommechanical characteristics. Prospects and advantages of its use in comparison with known analog – coefficient of a form of flat area are noted.*

**Keywords:** conformal radiuses of one-coherent flat area, plate, membrane, prismatic bar, maximum deflection, main frequency of fluctuations, critical effort, torsional rigidity.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Polia, G. Izoperimetricheskie neravenstva v matematicheskoy fizike [Текст] / G. Polia, G. Sege. – М.: KomKniga, 2006. – 336 s.
2. Korobko, V.I. Izoperimetricheskij metod v stroitel'noj mehanike: Teoreticheskie osnovy izoperimetricheskogo metoda [Текст] / V.I. Korobko. – М.: ASV, 1997. – 390 s.
3. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Текст] / A.V. Korobko. – М.: ASV, 1999. – 320 s.
4. Ivanov V.I. Konformnye otobrazhenija i ih prilozhenija [Текст] / V.I. Ivanov, V.Ju. Popov. – М.: Editorial URSS, 2002. – 324 s.

5. Korobko, V.I. Izoperimetricheskij metod v zadachah ustojchivosti plastinok [Tekst] / V.I. Korobko, A.N. Hustochnik. – Rostov-na-Donu: Severo-Kavkazskij nauchnyj centr vysshej shkoly, 1994. – 148 s.
6. Korobko, V.I. Reshenie zadach poperechnogo izgiba plastinok s ispol'zovaniem konformnyh radiusov [Tekst] / V.I. Korobko, A.A. Chernjaev // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2011. – №6. – S. 16-22.
7. Korobko, A.V. Determination of maximum deflection in transverse bending of parallelogram plates using the conformal radiuses ratio [Text] / A.V. Korobko, A.A. Chernyaev // Russian Aeronautics. – 2013. – Volume 56. – Issue 2. – Pp. 131-134.
8. Chernjaev, A.A. K voprosu o raschete trapecievidnyh plastinok iz uslovija zhestkosti [Tekst] / A.A. Chernjaev // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2013. – №1. – S. 37-42.
9. Chernjaev, A.A. K voprosu o raschete plastinok srednej tolshhiny iz uslovija zhestkosti [Tekst] / A.A. Chernjaev // Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. – 2012. – №1. – S. 83-89.
10. Chernjaev, A.A. Dinamicheskij raschet pravil'nyh n-ugol'nyh, treugol'nyh i rombicheskikh sharnirno opertyh plastinok s ispol'zovaniem otnoshenija konformnyh radiusov v kachestve geometricheskogo argumenta [Tekst] / A.A. Chernjaev // Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. – 2012. – №2. – S. 63-71.
11. Chernjaev, A.A. Dinamicheskij raschet kruglyh, pravil'nyh n-ugol'nyh, treugol'nyh i rombicheskikh zhestko zashhmlennyh plastinok s ispol'zovaniem otnoshenija konformnyh radiusov v kachestve geometricheskogo argumenta [Tekst] / A.A. Chernjaev // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2012. – №2. – S. 24-33.

**A. Chernyaev**

State university – educational-science-production complex, Orel

Candidate of technical sciences, senior lecturer of the department «Building designs and materials»

Ph.: +7 (4862) 73-43-49

E-mail: chernyev87@yandex.ru

**M. Prokurov**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk

Candidate of technical sciences, associate professor «Building designs»

Ph.: +7 (4832) 64-59-15

E-mail: m.prokuroff@mail.ru

**S. Shlyakhov**

State university – educational-science-production complex, Orel

Student of the department «Building designs and materials»

Ph.: +7 (4862) 73-43-49

E-mail: shlyakhov.stas@mail.ru

## **ЭВОЛЮЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ В ОБЛАСТИ ОСВОЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДОВ**

*Проведен исторический обзор теоретических представлений в области освоения береговых территорий городов по четырем основным этапам становления градостроительной науки: эпоха рабовладельческого строя, эпоха феодального строя, эпоха становления капитализма и эпоха индустриализации. Выявлены характерные принципы освоения береговых территорий городов в каждый исторический период. Систематизированы современные подходы к решению проблемы освоения береговых территорий городов.*

**Ключевые слова:** градостроительство, береговые территории, канал, пойма, рекреационная зона, город на побережье.

С древнейших времен водные ресурсы играли важнейшую роль в становлении человечества. Люди стремились к заселению берегов рек, морей, озер, благодаря обилию ценных природных ресурсов, благоприятному климату, удачному расположению и т.д. Но освоение береговых территорий всегда было связано с определенными трудностями, обусловленными агрессивным характером воздействия водоема. Колебания уровня воды, вызванные приливами, паводками и половодьем, приводили к затоплению и подтоплению прибрежных территорий. Освоение береговых территорий города всегда находилось на грани между удобством и простотой строительства и близостью к порогу затопления. Таким образом, на протяжении всей истории градостроительства освоение пойменных территорий практически не производилось в связи со сложностью инженерных решений их освоения.

В настоящее время ситуация изменилась. Города разрастаются, образуя мегаполисы, агломерации, теряют свои границы, исчерпывают территориальные ресурсы развития. В водоемы выступают как естественные препятствия для равномерного развития города. Чаще всего города возникали в месте слияния рек на высоких, аккумулятивных берегах, что приводило к секторному или линейному развитию города в единственно возможном направлении. В то время как противоположные берега, чаще всего пойменные, не осваивались.

В сложившейся ситуации дефицита городских территорий возникает необходимость выработки современной методики освоения пойменных территорий городов, включающей не только инженерные мероприятия по защите от затопления и подтопления, но и особые архитектурно-планировочные приемы проектирования, основанные на тщательном анализе существующих теорий и практик в этой сфере.

Проблема освоения пойменных территории стала актуальной лишь в конце XX века с истощением резервов развития городских территорий. Как следствие, все существующие исследования этого вопроса, а также теоретическая и методологическая база, охватывают лишь конец XX и XXI век, и многие аспекты до сих пор не до конца изучены. В данной ситуации имеет смысл проследить историю освоения **береговых территорий** городов в целом, включая затопляемые и незатопляемые территории, с целью выявить основные принципы и закономерности их заселения, повлиявшие на дальнейшее формирование и современное состояние приречных территорий городов.

**Береговые территории** – довольно широкое и размытое понятие, под которым может подразумеваться и берег как узкая полоса взаимодействия между сушей и водоемом, и само пространство реки с островами и косами, и, в принципе, любая часть суши самого разного размера, топологии и конфигурации, прилегающая к водоему. В данной работе под береговыми

ми территориями подразумевается сам водоем и прилегающие территории, градостроительное функционирование которых в той или иной степени зависит него.

Рассмотрим состояние береговых территорий в каждый исторический период и постараемся определить основные закономерности их заселения и их роль в формировании городов.

### **1. Исторический обзор теории и практики освоения береговых территорий.**

Поскольку, как говорилось выше, реальные исследования в области освоения береговых территорий относятся в основном к XX-XXI веку, то историю этого вопроса в общих чертах можно проследить, лишь опираясь на существующие исследования историков-градостроителей: Е.А. Ахмедовой, А.В. Бунина, А.Г. Головина, Т.Ф. Саваренской, В.Л. Глазычева, Т.Я. Ребайн и других авторов. В данном разделе приводятся основные этапы освоения береговых территорий, а также господствующие в данный исторический период теоретические представления в этой области.

#### **1.1 Рабовладельческий строй**

##### **Древний мир**

Первые упоминания о разумном заселении береговых территорий относятся к периоду неолита (более поздней стадии). Люди сооружали свайные постройки над акваториями рек, озер и болот, и вели оседлый образ жизни, полностью зависящий от водоема. Размещение над водой объясняется как большим значением рыбной ловли в хозяйстве их обитателей, так и защитными, оборонительными целями. Эта типология сооружений стала первым шагом к освоению водного пространства, но была очень ненадежна и распространилась лишь в определенных регионах вне города [13].

##### **Египет**

Нил, протекающий от Эфиопского нагорья и Центральной Африки к Средиземному морю, всегда был важнейшим условием существования Египта. Благодаря этой реке он еще в III тысячелетии до н. э. превратился в самое большое и процветающее государство Восточного Средиземноморья [9].

Страна процветала, начиная с IV-го тысячелетия до н.э., вплоть до римского завоевания. Ключевое значение в это время имел Нил, так как ежегодное половодье позволяло бороться с засухой и расширять границы пахотных земель. Регулирование паводковых вод повышало урожайность, а осушение затопленных территорий, на которых оставался слой плодородного ила, позволяло расширять обрабатываемые площади. Вплоть до 1500 г. до н. э. никаких механических приспособлений для подъема воды не существовало. «Остается неясным вопрос как произошел переход от практики регулирования паводковых вод и ручного полива к созданию широкомасштабной ирригационной системы, но в период Среднего царства (ок. 2040-1640 до н. э.) ирригация больших участков поймы уже активно применялась при земледелии» [14].

Нил не только обеспечивал условия для земледелия, но был еще и главной транспортной артерией Древнего царства. По реке перевозились тяжелые грузы, в том числе разнообразные строительные материалы. В эту эпоху появились первые весельные и парусные корабли как для гражданских, так и для военных нужд. В то же время сложная конфигурация дельты и ее устьев создавала препятствие для иноземного вторжения. Все крупные города Египта, такие как Аварис, Танис, Бубастис располагались в дельте Нила.

Все города Древнего Египта располагались в непосредственной близости к Нилу, что было связано с опасностью их затопления во время разлива. Поэтому впервые в 3 веке до н.э. стало применяться обвалование для защиты от затопления. Такие города, тем не менее, существовали недолго, так как валы были изготовлены из кирпича-сырца и постепенно размывались, что приводило к затоплению. Также впервые стали сооружаться плотины, дамбы, каналы и прочие инженерные сооружения, так как государство было заинтересовано в освоении затопляемых земель как можно ближе к Нилу.

«Сложные системы осушения болот и обводнения пустынь могли быть осуществлены только силами централизованных государств. Египтяне подхватили процесс естественного подсыхания климата в дельте Нила и фактически создали весь ее ландшафт, поднимая деревни и дворцово-храмовые комплексы над верхним уровнем сезонного затопления» – В.Л. Глазычев [3].

Таким образом, сознательное освоение береговых территорий началось со строительством первых городских поселений еще в III тысячелетии до н.э.

### **Древняя Греция**

VIII-V вв. до н.э. считается периодом становления древнегреческой цивилизации. Первостепенную роль в возникновении городов приобретает стратегический фактор, который играет ключевое значение при выборе места строительства городов. Первые акрополи возникают на холмах с целью обороны, затем с развитием судоходства и мореплавания на первый план выдвигаются удобные естественные гавани. Таким образом, в VII-V вв. до н.э. большинство древнегреческих городов разместилось либо в глубине протяженных заливов (Гераклея и Аргос), либо в проливах (Мессана, Византий, Халкида), либо на полуостровах, выступающих в море (Милет, Селинут, Пирей (рис. 2-4), либо на перешейках (Коринф), либо на островах (Сиракузы), либо под защитой острова, ослабляющего морской прибой (Александрия, Ассос, Книд). Но каково бы ни было расположение города, греки всегда искали хорошо защищенную гавань с широкими песчаными отмелями для постройки и оснастки гребных судов, а также их текущего ремонта. Каждый более или менее крупный город имел по крайней мере две гавани: военную и торговую. Торговая гавань была просторнее военной, но последнюю обносили стенами для защиты кораблей. Еще одним стратегическим фактором помимо размещения на холмах и крутых берегах было размещение города над заболоченными территориями, также с целью защиты от нападения. Греческие зодчие первыми задумались о «естественной природной оправе города, которая бы способствовала его архитектурной выразительности» [1]. Это также послужило причиной возникновения городов на извилистой береговой полосе, крутом берегу моря или живописной гавани (Микены, Тиринф, Ассос, Мессана, Эгина). Островное положение страны позволяло не использовать крепостные стены, что делало возможным беспрепятственный рост городов во всех направлениях.

### **Древний Рим**

Римская историческая традиция делит историю Римского государства на три эпохи: эпоху царей (VIII-VI вв. до н.э.), эпоху республики (VI-I вв. до н.э.), эпоху империи (I-V вв. н.э.). Римская культура на протяжении всех этапов ее становления испытывала на себе влияние Древней Греции. В области освоения береговых территорий римляне не обладали столь обширной практикой как древнегреческая или египетская цивилизации в силу своего континентального расположения и во многом политики правителей, которые не ставили целью освоение неудобных земель. Широкое развитие получили такие сферы как строительство портовых сооружений, акведуков, и, впервые, вертикальная планировка. В это время возникают такие крупные портовые города, как Остия, Брундисий, Александрия, Пирей. I век до н.э. отмечен деятельностью первого исследователя в области архитектуры и градостроительства Витрувия (Marcus Vitruvius Pollio), написавшего трактат «10 книг об архитектуре». Он считал, что важнейшим фактором развития города являются «климатические и природные богатства», его географическое положение, прилегающие водоемы. Таким образом, контуры города в те времена не стремились к правильным внешним очертаниям, они поддавались рельефу и контуру морского побережья или берега реки, «стратегический фактор должен преобладать над экономическим» [2].

### **1.2. Феодалный строй**

После падения Римской империи Центральная и Западная Европа на протяжении всего тысячелетия не имела объединяющего культурного центра. Хотя Византийская империя существовала долгое время после падения Рима, ее экономические и культурные связи охватывали лишь некоторые города Италии, Малую Азию, Болгарию, Сербию и Причерноморье. Таким образом, эпоха в хронологических рамках VI-IX вв. характеризуется глубочайшим упадком всей европейской культуры.

### **Центральная и Северная Европа. Раннее Средневековье**

На протяжении V, VI веков племена в Центральной и Западной Европе грабили населенные пункты вдоль рек Одера, Эльбы, Дуная, Рейна. Этот период характеризуется уменьшением городов и городского населения, активным возведением городских стен, чтобы защитить город. Новые города в этот период практически не образуются, все население сосредото-



чено в уже существующих поселениях, освоение береговых территорий теряет свое значение вплоть до IX-X вв. Возрождение городов начинается в IX-X вв. с развитием отраслей промышленности и рыночных отношений. Начинается строительство замков и крепостей для укрытия властителей и населения от набегов, вокруг них формируются поселения, связанные трудовыми и натурными повинностями. Именно такие поселения дают начало средневековому городу. Таким образом, тремя ключевыми факторами в образовании городов в эпоху средневековья стали рынок, промышленность и, что возвращает нас к вопросу формирования городов на берегу, стратегический фактор.

Образование большинства городов того времени проходило при несознательном выборе территории как следствие естественного роста и объединения изначальных поселений. Тем не менее, основным и самым быстрым видом транспорта являлся водный, следовательно, эти населенные пункты тяготеют к рекам и побережьям, что облегчает отправку товаров с караванного пути на суда. Самым рациональным считается расположение у переправ через реки, у слияния реки с притоком, при впадении реки в море, а также островное или полуостровное расположение, наличие брода или затона для стоянки, погрузки и ремонта судов. При расположении города в петле реки или на острове решается проблема складирования и охраны грузов (Верона на р. Адидже, Льеж на р. Маас, Баден на р. Лиммат, образуются город-остров или город-полуостров, например Париж на о. Сите, Стокгольм, Келльн (будущий Берлин), Любек, Мон-сен-Мишель – возникли как города-острова. Пример полуостровного расположения города – Сирмионе, Берн, Каменец-Подольский.

Из-за недостаточного развития технических навыков в те времена города были вынуждены приспособляться к рельефу местности в гораздо большей степени, что приводило к повторению очертаний берегов рек и оврагов в трассировке улиц и форме города. Это можно проследить в расположении улиц старого Лондона параллельно реке Темзе, в концентрических петлях улиц центральной части Берна, и, конечно же в уникальном расположении Венеции в системе скальных островов, разделенных каналами. Форма звезды г. Сиены также связана с тем, что магистральные улицы тянулись по водоразделам.

#### **Раннефеодальный период в Древней Руси.**

Первое славянское городище сложилось в I тысячелетии до н.э. на полуострове, сильно выступающем в Бискупинское озеро. Границы города по береговой линии были укреплены откосно забитыми сваями, к воротам вела хорошо укрепленная дамба. Холм городища Березняки с трех сторон омывался р. Сонохтой, а с четвертой был сооружен искусственный ров. Еще одно древнейшее Борщевское городище так же было основано на реке Дон. Таким образом, на Руси со времен освоения первых городских поселений как и в Средневековой Европе расположение на береговой территории максимально близко к крупным водоемам было основным градоформирующим фактором. К XII-XIII вв. расселение на береговых территориях из интуитивного стало целенаправленным: «мастера «горододельцы» всегда выбирали наиболее удобные, красивые и особо защищенные места» [1] – большинство городов возникло у рек (Псков, Киев, Нижний Новгород, Ярославль, Тверь, Кострома). Важными факторами было наличие удобной гавани – озера или затона, расположение в излучине реки (Суздаль, Великие Луки), острова (Остров, Порхов, Торопец), полуострова, глубоко вдающегося в озеро (Осташков), а так же высокие берега, дающие обзор и защиту от подъема воды. Города в Древней Руси тяготели к сельскохозяйственным угодьям и различным промыслам, например, Переяславль-Залесский или рыбное озеро Клещенко.

С развитием торговли и ростом городов большое значение стало придаваться открывающимся с воды панорамам города. Береговая полоса застраивается куполами, белокаменными стенами, башнями, чтобы подчеркнуть величие и обороноспособность города. «Великий водный путь из варяг в греки» открывают парадные сооружения, цепь монастырей и церквей на левом берегу р. Клязьмы торжественно оформляет речной путь во Владимир, примеров данного подхода множество [2]. С этого времени традиция строить у главных речных дорог прочно входит в практику отечественного градостроительства.

Таким образом, ключевая позиция у развитой системы рек и озер способствовала развитию славянских городов в Средние века.

### 1.3. Эпоха становления капитализма

#### Русские города в XVIII-XIX веках.

В XVIII-XIX века ситуация в России характеризуется завоеванием морского побережья. Внешняя политика Петра I направлена на борьбу за морские границы, что приводит к строительству второй столицы России – Санкт-Петербурга на побережье Финского залива и в устье реки Невы. Петровская эпоха характеризуется масштабными преобразованиями в области градостроительства, развитием и укреплением городов, строительством новых крепостей. В этой ситуации освоение береговых территорий приобретает второе рождение на более высоком градостроительном и инженерном уровне. Стоимость и трудоемкость работ отходят на второй план по сравнению с решением масштабных градостроительных задач по развитию и возвышению городов.

Исходный пункт планировки Петербурга – Адмиралтейская верфь, был размещен на острове в стратегически выгодном месте раздвоения Невы, что повлекло за собой укрепление берегов, частичный намыв и строительство первых набережных. Основными планировочными осями будущего города становятся изгибы рек Невы, Мойки и Фонтанки, что приводит к формированию радиально-кольцевой сетки улиц уже в Петровское время и дальнейшему ее совмещению с прямоугольной. На Васильевском острове в целях осушения болот прорыта система прямолинейных каналов, пересекающихся под прямым углом. Таким образом, уже в Петровское время прямолинейная сетка совмещается с радиально-кольцевой, формируя уникальную структуру будущей северной столицы.

С основанием Санкт-Петербурга связано множество новаций в области освоения береговых территорий – это в первую очередь масштабное строительство набережных и освоение новых территорий за счет осушения болот. На месте осушенных болот запроектированы системы каналов под руководством графа Бурхарда Кристофа фон Мюнниха\*.

Стоит особо отметить то, что в Петровскую эпоху реки и каналы намеренно включаются проектировщиками в архитектурные ансамбли. На месте проектирования ансамбля на стрелке Васильевского острова Нева распадается на два симметричных русла, и важно было учесть это в проекте. «Симметрия водных протоков была первым и намеренным условием для оформления стрелки, второе условие – громадный масштаб реки...» [1]. При проектировании Биржи – главного здания ансамбля – архитектор Джакомо Антонио Кваренги† не понимал важности реки, и проект, нуждавшийся в монументальности и выразительности форм, получился изящным и хрупким и потерялся на фоне открытого речного пространства. В своем проекте Тома де Томон, известный французский архитектор, художник, представитель зрелого классицизма, работавший в России, учел этот недостаток и включил реку в ансамбль острова [1]. Во всех последующих проектах этого периода панорамные виды и отражения в воде используются для усиления выразительности архитектуры, река включается в панораму города.

#### Эпоха становления капитализма в Европе

В условиях становления капиталистического строя со второй половины XVIII века главным градообразующим фактором становится индустрия. Наряду с промышленными городами большое развитие получают портовые города, лежащие на речных и морских торговых путях. Наибольший рост проявляют выгодно расположенные старые города, которые в результате развития судоходства и железнодорожного строительства превращаются в крупные транспортные узлы и рыночные центры (Париж, Ливерпуль, Лондон, Гамбург, Вена, Берлин).

\* Граф Бурхард Кристоф фон Мюнних в России был известен как Христофор Антонович Миних – российский генерал-фельдмаршал. В 1721 году по приглашению русского посла в Варшаве Г. Долгорукова Миних прибыл в Россию вести инженерные дела, задуманные Петром I. Когда он представил царю чертеж нового укрепления Кронштадта, довольный Петр сказал: «Спасибо Долгорукову, он доставил мне искусного инженера и генерала».

† Джакомо Антонио Доменико Кваренги, в старом написании *Гваренги* – архитектор и ведутист итальянского происхождения, едва ли не самый плодовитый представитель палладианства в русской архитектуре. Почетный вольный общник Императорской Академии художеств.

Состояние береговых территорий городов в XVIII-XIX вв. в Европе, а так же архитектурно-планировочные мероприятия по их преобразованию можно проследить на примере передовой европейской столицы – Лондона. С развитием промышленности в Лондоне как и в других крупных портовых городах берега реки настолько плотно застраиваются пристанями, складами и разнообразными промышленными предприятиями, что жилой застройке пробиться к воде абсолютно невозможно. Активное строительство мостов не решает транспортных проблем, практически не усиливает связи между берегами Темзы. Лондон в это время подвергается частичной планировочной реконструкции – государство сосредоточено на создании парков и скверов, благоустройстве города. Проблемы хаоса береговых территорий остаются без внимания вплоть до XX века с исчерпанием резерва городских территорий.

#### 1.4. Мировые тенденции XX века

Конец XIX – начало XX века знаменуются коренным переломом во всех сферах искусства, появляются новые направления в архитектуре и градостроительстве. Во всем мире начинается время активной борьбы между комплексным подходом к проектированию городов и сиюминутными градостроительными задачами. Здесь стоит упомянуть имя шотландского биолога, социолога и градостроителя Патрика Геддеса. Через социологию Геддес приходит к градостроительству, видя тесную связь между общественными процессами и характером урбанизации. Он вводит понятие конурбации, подходит к проблемам районной планировки, ландшафтной архитектуры и глобального города. «Геддес сделал попытку увидеть регион как целостную систему, функционирование которой искажается влиянием города-метрополии. По Геддесу, всякое планирование должно начинаться с изучения ресурсов природного, географического региона, с исследования того, как люди умеют использовать эти ресурсы, формируя культурный ландшафт. Собственно с Геддеса утверждается мысль о необходимости опережающих комплексных исследований, вместо одних лишь топографических, что вполне удовлетворяло архитектора до того» [3].

В конце XIX-XX веках на мировую арену проектирования выходит Америка, задавая новые тенденции в архитектуре и градостроительстве, повлиявшие на развитие береговых территорий городов. Ключевую роль здесь играет Всемирная выставка 1893 года в Чикаго и ее куратор Даниэл Хадсон Бернем, американский архитектор и градостроитель. В это время выдвинут лозунг: Город Красоты. Он заключается в попытке решить социальные и экономические проблемы не кардинальной перестройкой всех сфер жизни, а путем преобразования окружающей городской среды, создания благоприятных условий для жизнедеятельности. Дениэль Бернем как один из авторов этого подхода обозначает цель несколько деликатнее: «вернуть городу утраченную им визуальную и эстетическую гармонию и тем создать материальные основы для возникновения гармонии социального порядка».

Таким образом, с этого времени возрождается роль природного ландшафта в структуре города, начинают активно использоваться береговые территории, но не для размещения складов и торговых пристаней, а для создания комфортной рекреационной среды, набережных и парковых зон.

Во второй половине XX века в Японии, как и во многих других странах, активно возрождаются идеи модернизма. Проследить эти тенденции можно в концепции модернизации городов Кендзо Танге. «Город не должен проектироваться как завершенная планировочная система, постоянно сохраняя возможность свободного развития. Ни город-сад, ни города-спутники не могут считаться удачным выходом из положения, поскольку неизбежно нарастает маятниковая миграция между рабочими местами и местами проживания. Будущее за крупным, даже сверхкрупным городом, следовательно, надлежит: перейти на линейную систему; слить воедино систему скоростных коммуникаций, планировочную структуру и организацию строительства». Эта концепция была применена в утопическом проекте реконструкции Токио – в создании второго Токио над токийским заливом. Этот проект даже не рассматривался к реализации, так как в то время его стоимость была колоссальной. Тем не менее этот пример показывает, что уже в 50-е годы XIX века впервые была выдвинута идея использования водных пространств и береговых территорий в качестве резерва для развития центра города.

## 2. Обзор современной теории и практики в области освоения береговых территорий

### 2.1 Современные направления в отечественной теории освоения береговых территорий

Начиная с середины XX века в изучении проблемы береговых территорий выделилось несколько направлений: рациональное использование городских территорий, включая береговые; инженерное преобразование береговых территорий; вопросы архитектурно-планировочной организации береговых и приречных территорий; проблемы экологии и охраны береговых территорий. Вопросы рационального использования береговых территорий в разных аспектах взаимодействия города и водоема исследовались теоретиками С.А. Хасиевой, В.К. Щербань, А.П. Вергуновым, А.Г. Григорьяном, В.А. Нефедовым, Е.М. Микулиной, С.Б. Чистяковой, А.В. Сычевой, Ю.Б. Хромовым, С.Д. Митягиным и рядом других ученых. Вопросами инженерной организации береговых территорий занимались И.В. Лазарева, В.В. Шнайдер, Л.Р. Найфельд, В.Д. Оленьков и другие ученые.

Основные принципы инженерного преобразования береговых, в том числе пойменных территорий, можно рассмотреть на примере трудов Л.Р. Найфельда. «Инженерная подготовка пойменных и заболоченных территорий для градостроительства» [5] и «Гидротехника в градостроительстве» 1965 года. Найфельд в своих трудах классифицирует береговые территории по удобству их освоения, приводит анализ существующей на тот момент практики застройки пойменных территорий городов и возможные методы их инженерной подготовки. Все защитные сооружения разделяются на активные и пассивные. К активным относятся плотины с водохранилищами, обводные русла рек, ГЭС, регулирование русла. Пассивные инженерные сооружения представлены намывом территории, обвалованием (сооружение различных дамб по периметру территории застройки) и дренажными системами. Таким образом, весь отечественный опыт освоения пойменных территорий сводится к двум возможным вариантам - если включены в резерв природных ресурсов, то используются как рекреационные зоны; если не представляют природной ценности, то осваиваются под капитальное строительство путем намыва, либо обвалования. Намыв территории до нужной отметки осуществляется при новом строительстве, обвалование чаще всего применяется для защиты уже построенных зданий и сооружений. Но способы защиты могут варьироваться в зависимости от ряда факторов, таких как местные природно-климатические условия, наличие необходимых строительных ресурсов, гидрологический режим водоема и т.д.

Вопросы ландшафтной и архитектурно-планировочной организации береговых территорий рассмотрены в трудах Е.В. Гуськова, Т.И. Задворянской, Д.В. Литвинова, Ю.Н. Лобанова, М.А. Маташовой, И.Д. Родичкина, В.И. Стаускаса, В.А. Нефедова. Исследователи определяют основные проблемы береговых зон как комплексные, так и локальные, и предлагают пути и методики их решения.

Д.В. Литвинов в работе «Градэкологические принципы развития прибрежных зон» рассматривает прибрежные территории как контактные зоны урбанизированного и природного ландшафтов, приходит к выводу о необходимости рассмотрения береговых территорий в структуре градостроительной ткани города. Также в работе проводится исторический анализ прибрежных территорий, позволяющий выявить закономерности их развития. «В исследовании выявлена взаимосвязь формы акватории и композиционно-планировочной структуры крупного города, определены схемы исторического замещения функций, выявлена типология застройки прибрежных зон крупных городов. Также обозначен комплекс основных градостроительных и градэкологических проблем, связанных с развитием прибрежных территорий крупных городов; намечены направления эффективного использования береговых зон крупных городов» [6].

В работе М.А. Маташовой «Эколого-градостроительная организация приречных территорий крупного города» вырабатываются научно обоснованные методы эколого-градостроительной оптимизации приречных территорий города на основе сочетания ландшафтно-экологического подхода и анализа мирового опыта. Предлагаются следующие принципы развития береговых территорий: принцип экопозитивности среды, принцип социальной

направленности преобразований, принцип идентифицируемости пространства, принцип экономической целесообразности [7].

Труды Литвинова и Маташовой одни из немногих современных исследований в области освоения береговых территорий наряду с диссертацией архитектора Ха Дуи Ань «Направления преобразования и развития приречных территорий города Ханоя» (Санкт-Петербург, 2013). В данной диссертации автор рассматривает приречные территории как резерв городских общественных рекреационных пространств, но в связи с рядом проблем, возникших в ходе их исторического развития: «отрезанность города от реки, утрачивание озелененных пространств, хаотичность застройки, малоэффективность использования или заброшенность, композиционная и функциональная неорганизованность приречного пространства» [8], их рациональное использование фактически невозможно. В работе выявлены 4 зоны развития приречных территорий (на примере города Ханоя) для которых предложены различные принципы и направления развития, с возможностью их применения на практике.

## 2.2 Современные зарубежные исследования проблем береговых территорий

На сегодняшний день существует множество зарубежных исследований, касающихся градостроительного, архитектурно-планировочного, ландшафтного, географического, экологического аспектов преобразования береговых территорий, аналоги которых существуют в отечественной науке. В данной работе особый интерес представляют исследования, посвященные проблемы пойменных, затопляемых территорий, т.е. береговым территориями со сложными условиями, связанными с гидрологическим режимом водоема. Передовой страной в области строительства на затопляемых территориях по праву считаются Нидерланды. Основные принципы нидерландской школы проектирования можно проследить на примере теоретического труда «Amphibious housing in the Netherland» авторов Anne Loes Nillesen и Leroen Singelenberg. Затопляемые территории рассматриваются как ценный резерв городских территорий, который при грамотном инженерном и архитектурно-планировочном преобразовании может стать полноценной комфортной жилой средой. В работе приводятся классификация водоемов и возможные варианты их застройки, а также новая типология плавучего жилья и их характерные особенности и принципы размещения. Типология жилья для размещения в акваториях представлена домами-амфибиями (amphibious housing), домами на плавучем основании (floating housing), домами на плотинах (dyke housing), домами на береговой линии (waterside housing), домами на сваях (pile housing), намывными островами (terps) [10].

Подобные исследования проводятся также во многих странах Европы, Азии и в США, в особенности в городах со сложным гидрологическим режимом водоемов и обилием затопляемых территорий.

В связи с ухудшением экологии, возрастанием риска экстремального подъема уровня воды и участвовавшими повсеместно наводнениями выявление новых принципов проектирования на затопляемых территориях становится особенно актуальным. К подобным новым направлениям можно отнести так называемую плавучую архитектуру, направленную на защиту от наводнений. Ее представляют научные труды «Design for Flooding: Architecture, Landscape, and Urban Design for Resilience to Climate Change» (Защита от наводнений: архитектура, ландшафтный дизайн и градостроительство против изменений климата) авторов Donald Watson и Michele Adams [11], «Float!: Building on Water to Combat Urban Congestion and Climate Change» (Наводнение! Проектирование на воде для борьбы с перенаселением и изменениями климата) авторов Koen Olthuis и David Keuning [12]. «Extreme Architecture: Bulding for Challenging Environments» (Экстремальная архитектура: здания, противостоящие глобальным изменениям климата) автора Ruth Slavid.

Каждый их рассмотренных исторических периодов характеризуется особенными подходами и представлениями в области освоения береговых территорий, но в целом можно сделать вывод, что главная причина заселения береговых территорий – стратегический фактор. Ранние периоды истории характеризуются интуитивным заселением береговых территорий,

связанным с поиском воды и пищи, защитой от врагов, благоприятным климатом для жизни и ведения хозяйства. Осознание ценности жизни в непосредственной близости к крупному водоему происходит с образованием первых городов в I тысячелетии до н.э. С этого времени на первый план выходят такие факторы, как оборона города, удобные водные транспортные связи, благоприятная среда для ведения промыслов, выгодное стратегическое положение города, и практика формирования городов на береговых территориях прочно укореняется в мировой градостроительной практике.

С 1950-х годов береговые территории получают второе рождение и эта проблема включает исследования в самых разных областях: архитектурно-планировочная организация города, рациональное развитие городских территорий, инженерное освоение береговых пойменных территорий, экологический каркас города, организация рекреационного пространства и т.д. В настоящее время проблема береговых территорий как в России, так и за рубежом, рассматривается с самых разных сторон. Недостатком отечественной практики в области освоения береговых территорий городов можно считать локальность исследований, посвященных в основном либо одному из аспектов вопроса, либо определенному городу или области, либо рассмотренных с точки зрения конкретной дисциплины.

Таким образом, можно сделать вывод, что проблема освоения береговых (в том числе пойменных) территорий нуждается в комплексных исследованиях. В российских условиях необходим комплексный контекстуальный подход к освоению береговых территорий, который с одной стороны учитывает существующую ситуацию, а с другой использует новейшие методы и технологии ее инженерного и архитектурно-планировочного преобразования, направленные на максимальное сохранение и экономически эффективное, рациональное использование ресурсов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунин, А.В. История Градостроительства В 2-х т. – 2-е изд. Том первый. История градостроительного искусства [Текст] / А.В. Бунин. – М.: Стройиздат, 1979.
2. Саваренская, Т.Ф. История градостроительного искусства [Текст] / Т.Ф. Саваренская – М.: Стройиздат, 1984. – 389.
3. Глазычев, В.Л., Урбанистика [Текст] / В.Л. Глазычев. – М.: Европа, 2008. – 220 с.
4. SPEECH: Материальность. – 2009. – №4. – 251 с.
5. Найфельд, Л.Р. Инженерная подготовка пойменных и заболоченных территорий для градостроительства [Текст] / Л.Р. Найфельд. – М.: Стройиздат, 1974. – 183 с.
6. Литвинов, Д.В. Градоэкологические принципы развития прибрежных зон на примере крупных городов [Текст]: дис. канд. арх.: 18.00.04 / Д.В. Литвинов – Санкт-Петербург, 2009. – 204 с.
7. Маташова, М.А. Эколого-градостроительная оптимизация приречных территорий [Текст]: дис. канд. арх.: 05.23.22 / М.А. Маташова. – Санкт-Петербург, 2011. – 230 с.
8. Ха Дуи Ань. Направления преобразования и развития приречных территорий города Ханоя [Текст]: дис. канд. арх.: 05.23.22 / Ха Дуи Ань. – Санкт-Петербург, 2013. – 180 с.
9. Уайт, Джон Мэнчип. Боги и люди Древнего Египта [Текст] / Уайт Дж. М.: Центрполиграф, 2007. – 189 с.
10. Anne Loes Nillesen, Amphibious housing in the Netherland / Nillesen A.L. – Rotterdam: NAI Uitgevers, 2011 – 127.
11. Donald Watson, Design for Flooding: Architecture, Landscape, and Urban Design for Resilience to Climate Change / Watson D. – USA: Wiley & Sons Inc., 2011 – 310.
12. Koen Olthuis, Float!: Building on Water to Combat Urban Congestion and Climate Change / Koen Olthuis – Amsterdam: Frame Publishers, 2010 – 304.
13. Начальный период развития городских поселений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://boengo.com/Gradostroitelstvo-rabovladelcheskogo-i-srednevekovogo-ljo.html>.
14. История Египетского царства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://egypt-info.ru/about/nature\\_geography/niletheriver.html](http://egypt-info.ru/about/nature_geography/niletheriver.html).

**Ходотова Екатерина Алексеевна**

Самарский архитектурно-строительный университет, г. Самара

Ассистент кафедры «Архитектура»

E-mail: [arch\\_katherine@rambler.ru](mailto:arch_katherine@rambler.ru)

E. HODOTOVA

## THE EVOLUTION OF THEORETICAL KNOWLEDGE IN THE DEVELOPMENT OF COASTAL AREAS OF CITIES

*A historical review of theoretical concepts in the development of coastal areas of cities was conducted in four main stages of the urban development of science: the era of the slave system, the era of feudalism, the era of capitalism and the era of industrialization. The principles of development of coastal areas in the cities of each historical period were detected. Modern approaches to solving the problems of the coastal areas of cities were systematized.*

**Keywords:** urban planning, coastal areas, the channel, floodplain, recreation area, a city on the coast.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bunin, A.V. Istorija Gradostroitel'stva V 2-h t. – 2-e izd. Tom pervyj. Istorija gradostroitel'nogo iskusstva [Tekst] / A.V. Bunin. – M.: Strojizdat, 1979.
2. Savarenskaja, T.F. Istorija gradostroitel'nogo iskusstva [Tekst] / T.F. Savarenskaja – M.: Stroizdat, 1984. – 389.
3. Glazychev, V.L., Urbanistika [Tekst] / V.L. Glazychev. – M.: Evropa, 2008. – 220 s.
4. SPEECH: Material'nost'. – 2009. – №4. – 251 s.
5. Najfel'd, L.R. Inzhenernaja podgotovka pojmennyh i zabolochennyh territorij dlja gradostroitel'stva [Tekst] / L.R. Najfel'd. – M.: Strojizdat, 1974. – 183 s.
6. Litvinov, D.V. Gradojekologicheskie principy razvitija pribrezhnyh zon na primere krupnyh gorodov [Tekst]: dis. kand. arh.: 18.00.04 / D.V. Litvinov – Sankt-Peterburg, 2009. – 204 s.
7. Matashova, M.A. Jekologo-gradostroitel'naja optimizacija prirechnyh territorij [Tekst]: dis. kand. arh.: 05.23.22 / M.A. Matashova. – Sankt-Peterburg, 2011. – 230 s.
8. Ha Dui An'. Napravlenija preobrazovanija i razvitija prirechnyh territorij goroda Hanoja [Tekst]: dis. kand. arh.: 05.23.22 / Ha Dui An'. – Sankt-Peterburg, 2013. – 180 s.
9. Uajt, Dzhon Mjenchip. Bogi i ljudi Drevnego Egipta [Tekst] / Uajt Dzh. M.: Centrpoligraf, 2007. – 189 s.
10. Anne Loes Nillesen, Amphibious housing in the Netherland / Nillesen A.L. – Rotterdam: NAI Uitgevers, 2011 – 127.
11. Donald Watson, Design for Flooding: Architecture, Landscape, and Urban Design for Resilience to Climate Change / Watson D. – USA: Wiley & Sons Inc., 2011 – 310.
12. Koen Olthuis, Float!: Building on Water to Combat Urban Congestion and Climate Change / Koen Olthuis – Amsterdam: Frame Publishers, 2010 – 304.
13. Nachal'nyj period razvitija gorodskih poselenij [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://boengo.com/Gradostroiteljstvo-rabovladeljcheskogo-i-srednevekovogo-ljo.html>.
14. Istorija Egipetskogo carstva [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://egypt-info.ru/about/nature\\_geography/niletheriver.html](http://egypt-info.ru/about/nature_geography/niletheriver.html).

#### E. Hodotova

Samara university of architecture and construction, Samara

Assistant of the department «Architecture»

E-mail: arch\_katherine@rambler.ru

УДК 666.94.052.6

АКУЛОВА М.В., СЕЛИВЕРСТОВА О.В.

### **ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩЕ-ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА И ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ РАЗЛИЧНОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА**

*Проведено исследование влияния комплексной пластифицирующе-воздухововлекающей добавки на свойства цементных систем с различным содержанием трехкальцевого алюмината. Исследовано влияние количества добавки на реологические свойства цементного теста, зависимость гидратации и кинетики твердения цементного камня, а также его физико-механических характеристик от содержания трехкальцевого алюмината в цементах.*

**Ключевые слова:** нормальная плотность, сроки схватывания, цементное тесто, дозировка, трехкальцевый алюминат, комплексная пластифицирующая добавка.

Применение цемента при производстве строительных материалов уже не представляется возможным без применения химических добавок к нему, так как это позволяет значительно улучшить реологические свойства и повысить технико-экономические, физико-механические показатели строительного материала [1]. При проектировании и производстве материалов главными критериями его долговечности являются правильно выбранные вяжущее и заполнители, соблюдение всех технологических показателей, качественная укладка и уплотнение смеси. Особую роль при выборе материалов необходимо отдать выбору цемента, а именно, необходимо учитывать такие показатели, как класс цемента, нормальную плотность, сроки схватывания, тонкость помола, содержание трехкальцевого алюмината ( $C_3A$ ). Известно, что содержание трехкальцевого алюмината отвечает за гидратацию и дальнейшую кинетику твердения в раннем возрасте цементных систем [2]. Также существуют определенные проблемы качества цемента при недожоге и недомоле цементного клинкера, которые влияют на содержание фаз в клинкере, в том числе и на  $C_3A$ . Тенденция введения химических и минеральных добавок при производстве цемента позволяет частично решить эти проблемы и улучшить качество цементной промышленности. ГОСТ 31108-2003 «Цементы общестроительные. Технические условия» показывает, что существует определенная номенклатура цементов, различающихся по вещественному и минералогическому составу.

В связи с этим не только разновидность цемента, но и такие факторы как тип и строение молекул модификатора, его молекулярная масса и структура, выбранная дозировка будут определять дальнейшие реологические свойства цементных систем и влиять на набор прочностных характеристик цементного камня. Поэтому целью данной работы является исследование влияния комплексной пластифицирующе-воздухововлекающей добавки на свойства цементных систем с различным содержанием трехкальцевого алюмината. Известно [4], что алюминатность цементов дает определенные ориентиры при выборе оптимальной дозировки добавки. Так, по приведенным данным она составляет менее 0,5% для низкоалюминатных цементов и более 0,5% для средне и высокоалюминатных цементов.

В работе исследовалось влияние количества добавки на реологические свойства цементного теста, зависимость гидратации и кинетики твердения цементного камня, а также его физико-механических характеристик от содержания трехкальцевого алюмината в цементах.

Комплексная пластифицирующе-воздухововлекающая добавка для бетонов, эксплуатирующихся в климатических условиях с повышенными требованиями по морозостойкости,



бралась в следующем соотношении: суперпластификатор С-3 – 60%; содосульфатная смесь ССС – 30%; смола древесная омыленная СДО – 10%, где суперпластификатор С-3 – продукт конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, смола древесная омыленная СДО – синтез смолы древесной омыленной на основе экстракционной смолы, содосульфатная смесь ССС – натриевые соли угольной и серной кислоты.

В качестве исследуемых цементов в цементной системе были выбраны:

- низкоалюминатный портландцемент Липецкий ЦЕМ I 42,5, С<sub>3</sub>А 3%;
- среднеалюминатный портландцемент Мордовский ЦЕМ I 42,5, С<sub>3</sub>А 5,5%;
- высокоалюминатный портландцемент Спасскцемент ЦЕМ I 42,5, С<sub>3</sub>А 11,0%.

Характеристика портландцементов согласно паспортным данным представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика и минералогический состав портландцементов

Наименование вяжущего	Предел прочности при сжатии, МПа	Сроки схватывания, ч-мин.		Нормальная густота цементного теста, %	Тонкость помола цемента, %	С <sub>3</sub> S С <sub>2</sub> S С <sub>3</sub> А С <sub>4</sub> АF, %
		начало	конец			
Липецкий ЦЕМ I 42,5Н	42,5	2 - 40	4 - 10	25,0	92	65,5 18,0 3,0 12,5
Мордовский ЦЕМ I 42,5Н	42,5	2 - 40	4 - 00	24,0	90	62,0 15,0 5,5 12,0
Спасский ЦЕМ I 42,5Н	42,5	1 - 50	2 - 50	26,6	92	64,0 13,0 11,0 11,5

Данные виды цемента относятся к бездобавочным цементам (класс цемента ЦЕМ I 42,5) и к первой группе по эффективности пропаривания. Кроме различных показателей содержания трехвалентного алюмината в клинкере данные виды цемента отличаются различной водопотребностью. Так, у высокоалюминатного портландцемента самая большая водопотребность, характеризующаяся показателем нормальной густоты цементного теста – 26,6%, что характеризует показатель максимального содержания воды для затворения вяжущего, которое будет удерживать ее за счет капиллярных и адсорбционных сил до получения цементного теста нормальной консистенции [2]. Сроки схватывания Спасского портландцемента имеют наименьшие показатели по времени из-за высокого содержания С<sub>3</sub>А, соответственно, у низкоалюминатного цемента они имеют наибольшее значение.

Эффективность действия комплексной пластифицирующе-воздухововлекающей добавки в цементных системах проверялась согласно ГОСТ 310.3-81 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Добавка рассчитывалась от массы цемента по сухому веществу, для проведения исследований были выбраны дозировки 0,3%, 0,5% и 0,7% соответственно. Результаты испытаний цементных систем представлены в таблице 2.

Как видно из приведенных данных, во всех цементных системах с увеличением дозировки комплексной пластифицирующе-воздухововлекающей добавки уменьшается нормальная густота цементного теста, при этом увеличиваются его сроки схватывания относительно контрольного состава.

Исходя из полученных значений, можно сделать вывод, что данные виды цемента относятся к цементам медленносхватывающимся, так как начальные сроки схватывания без добавки составили более 2 часов [5].

Таблица 2 – Влияние количества добавки на реологические свойства цементных систем

№	Наименование вяжущего	Количество добавки, %	Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания, ч – мин.		Сроки схватывания Δ, %
				начало	конец	
1	Липецкий ЦЕМ I 42,5 Н С <sub>3</sub> А 3,0%	-	25,0	<b>2 - 55</b>	<b>4 - 50</b>	-
		0,3	23,6	4 - 20	6 - 25	+ 33,0
		0,5	21,7	5 - 05	7 - 50	+ 62,0
		0,7	20,8	6 - 25	9 - 05	+ 87,5
2	Мордовский ЦЕМ I 42,5 Н С <sub>3</sub> А 5,5%	-	24,0	<b>2 - 20</b>	<b>4 - 25</b>	-
		0,3	22,7	3 - 45	5 - 35	+ 26,0
		0,5	22,0	4 - 10	6 - 55	+ 56,0
		0,7	21,2	5 - 25	7 - 30	+ 69,0
3	Спасский ЦЕМ I 42,5 Н С <sub>3</sub> А 11,0%	-	26,6	<b>2 - 05</b>	<b>3 - 20</b>	-
		0,3	25,8	2 - 40	4 - 05	+ 22,5
		0,5	24,5	3 - 10	4 - 45	+ 43,0
		0,7	23,8	4 - 20	5 - 25	+62,5

Объяснить влияние добавки на увеличение сроков схватывания можно проведя анализ факторов, влияющих на твердение цементных систем. Известно [2], что на сроки схватывания цементной системы влияют:

- количество двуводного гипса, который является важнейшим регулятором скорости схватывания цемента. Содержание его в цементе зависит от тонкости помола самого цемента, которая зависит от содержания алюминатов кальция и щелочных соединений в вяжущем. Чем больше этих соединений, тем меньше тонкость помола вяжущего вещества;

- количество трехкальциевого алюмината С<sub>3</sub>А, отвечающего за нарастание структурной прочности системы;

- количество воды затворения, добавки, вводимой в цементное тесто;

- температура окружающей среды.

При затворении цементного теста рабочим раствором добавки в определенных дозировках происходит смачивание цементных частиц, на поверхности клинкерных минералов образуются гидратные новообразования этtringита, обвалакиваемые экранирующей пленкой, в результате вода практически перестает реагировать и вступать во взаимодействие с новыми гидратными образованиями, вследствие чего наступает индукционный период, период схватывания цементного теста [4]. Индукционный период длится несколько часов, и его длительность будет зависеть от строения и состава экранирующих пленок, которые образовались при введении в цементное тесто рабочего раствора добавки. Соответственно, с увеличением дозировки добавки увеличиваются сроки его схватывания. Так как исследуемая в данной работе добавка содержит компоненты поверхностно-активных веществ и относится к классу пластифицирующе-воздухововлекающих, то будет проявляться ее замедляющее действие на начальный период схватывания и на набор прочности цементного камня в ранние сроки твердения.

Анализируя данные, приведенные в таблице 2, можно сделать вывод, что наибольшее замедляющее действие добавки проявляется в цементных системах с небольшим содержанием трехкальциевого алюмината. При введении в цементную систему добавки в количестве 0,3% сроки схватывания относительно контрольного состава увеличились на 33,0%, при дозировке 0,5% – на 62,0%, при введении дозировки 0,7% – на 87,0%. При этом показатель нормальной густоты цементного теста при увеличении дозировки добавки до 0,7% снизился с 25% до 20,8%, что подтверждает высокий водоредуцирующий эффект данного вещества. Благодаря тому, что добавка обладает сильным пластифицирующим действием, удалось получить требуемые значения в данном испытании: разжижение цементного теста при уменьшении расхода воды до требуемого показателя прибора Вика: погружение пестика в цементное тесто до 5-7 мм. Необходимо также отметить эффект воздухововлечения в цементное тесто, что в дальнейшем может привести к изменению структуры цементного камня с образованием условно-замкнутых пор.

Рассматривая реологические свойства цементной системы с добавкой в определенных дозировках на Мордовском портландцементе, можно также увидеть его эффективность при определении нормальной густоты и срокам схватывания цементного теста. Так как цемент является среднеалюминатным и его нормальная густота составляет 24,0%, то это говорит о том, что поведение модификатора, обладающее пластифицирующим и воздухововлекающим действием, будет отличаться в данной системе наиболее выраженными эффективными показателями по реологическим свойствам, чем на Липецком портландцементе с наименьшим процентным содержанием  $C_3A$  и большей водопотребностью.

На Мордовском портландцементе при введении дозировки добавки от 0,3% до 0,7%, происходит общее увеличение времени сроков схватывания цементного теста относительно эталона на 69,0%. Необходимо также отметить, что дозировка добавки 0,7% от массы цемента проявила свою эффективность: тесто обладало хорошей пластичностью с достаточным воздухововлечением, хорошо укладывалось в кольцо прибора Вика.

Сравнивая результаты испытаний сроков схватывания Мордовского ЦЕМ I 42,5 Н с содержанием  $C_3A = 5,5\%$  с низкоалюминатным портландцементом Липецкий ЦЕМ I 42,5 Н с  $C_3A = 3,0\%$ , можно сделать вывод о том, что контракционные явления в первые часы гидратации цементных систем развиваются с разной скоростью.

При взаимодействии трехкальциевого алюмината с водой образуется гидроалюминат кальция [4], благодаря которому реакция гидратации протекает с большей скоростью. Далее, образующийся шестиводный трехкальциевый алюминат  $C_3A$  создает рыхлую кристаллизационную структуру, тем самым вызывая снижение пластичности цементного теста. Соответственно, на низкоалюминатном цементе явления контракции и гидратации происходят медленнее.

Реологические свойства цементной системы с добавкой на высокоалюминатном Спасском портландцементе ЦЕМ I 42,5 с содержанием трехкальциевого алюмината  $C_3A 11,0\%$  идентичны предыдущим цементным системам. Наблюдается общее увеличение сроков схватывания при дозировке 0,7% относительно эталона на 62,5% и снижение показателя нормальной густоты цементного теста с 26,6% до 23,8%. Известно [2], что на адсорбционную способность ПАВ значительное влияние оказывает содержание  $C_3A$  в клинкере. С увеличением его содержания в клинкере сверх 7% адсорбционная способность по отношению к ПАВ значительно возрастает. Но, несмотря на содержание в клинкере высокого процента трехкальциевого алюмината, данный вид цемента обладает наибольшей водопотребностью: нормальная густота цементного теста 26,6%. Это, соответственно, повлияло на начальный индукционный период и на конечные сроки схватывания цементного теста.

В таблице 3 представлены результаты определения прочности на сжатие цементного камня из цементов с различным содержанием алюмината с добавкой.

Таблица 3 – Влияние количества добавки на прочность при сжатии цементного камня

№	Наименование вяжущего	Дозировка, %	Прочность при сжатии $R_{сж}$ , МПа	$\Delta R_{сж}$ , %
1	Липецкий ЦЕМ I 42,5 Н $C_3A 3,0\%$	-	<b>42,6</b>	-
		0,3	43,4	+ 2,0
		0,5	44,8	+5,0
		0,7	43,2	+1,5
2	Мордовский ЦЕМ I 42,5 Н $C_3A 5,5\%$	-	<b>44,2</b>	-
		0,3	44,9	+1,7
		0,5	45,4	+3,0
		0,7	44,6	+1,0
3	Спасский ЦЕМ I 42,5 Н $C_3A 11,0\%$	-	<b>46,1</b>	-
		0,3	46,4	+0,8
		0,5	47,9	+4,0
		0,7	46,6	+1,1

Проба цементного теста для испытания на прочность цементного камня с добавкой отбиралась из цементного теста нормальной густоты согласно ГОСТ 310.3. Были заформованы образцы-кубы размером 30×30×30 мм, которые выдерживались в камере нормального твердения в течение 28 суток. Рассматривая результаты испытаний прочности цементного камня на сжатие, можно наблюдать положительную динамику увеличения показателей прочности относительно контрольного состава на всех видах цемента. Так, на Липецком портландцементе наибольшее значение удалось получить при дозировке добавки 0,5% – прирост прочности составил +5,0%. При этом внутренняя структура цементного камня обладала наличием мелких пор, что, по-видимому, вызвано компонентом добавки смолы древесной омыленной СДО.

При испытании на прочность цементного камня на Мордовском портландцементе с добавкой также наблюдается небольшой прирост прочности относительно эталона. При этом показатели контрольного состава на среднеалюминатном портландцементе выше показателей цемента с низким содержанием  $C_3A$ . Наблюдается небольшая динамика увеличения прочности образцов с добавкой в дозировке 0,3% и 0,5%, но при дозировке 0,7% значения равны контрольным без добавки. Такой эффект можно объяснить увеличением пор в цементном камне, содержание которых повлияло на спад прочностных характеристик. Тот же эффект наблюдается и на Спасском портландцементе.

Известно [3], что из-за 1% вовлеченного воздуха происходит потеря прочности бетонного камня примерно на 4-5%. Воздействие солей сульфокислот в составе комплексной добавки позволяет получить небольшое превышение прочностных показателей в различных дозировках.

Известно [1], что прямой зависимости между сроками схватывания и набором прочности цементов, содержащих комплексные модификаторы, нет. Поэтому введение таких модификаторов в цементную систему является перспективным решением, так как механизмы действия, уровни структуры данных компонентов в добавке отличны. Соли сульфокислот воздействуют на надмолекулярном уровне [1], а поверхностно-активные вещества – на микро- и макроскопическом уровне, что позволяет в любой цементной системе не только дополнить пластифицирующие эффекты каждого из них, но и убрать отрицательный фактор – прочность бетона на ранних стадиях и последующие периоды твердения. Таким образом, влияние добавки на исследованные цементные системы с различным содержанием  $C_3A$  подтверждает свою эффективность по пластифицирующим и водоредуцирующим свойствам, а также служит созданию внутренней поровой структуры цементных композиций, что позволяет применить ее в бетонах с повышенными требованиями по морозостойкости. Показатели прочности можно повысить хорошим качеством заполнителей и грамотно подобранным составом бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст] / В.Г. Батраков. – М., 1998. – С. 167-171.
2. Строительное материаловедение [Текст]: учеб. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – С. 287-290.
3. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона [Текст] / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: Палеотип, 2006. – С. 26-28.
4. Зоткин, А.Г. Бетон и бетонные конструкции [Текст] / А.Г. Зоткин. – Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 168 с.
5. ГОСТ 30515-97 Цементы. Общие технические условия [Текст]. – М., 1998. – 2 с.

### **Марина Владимировна Акулова**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Производство строительных материалов, изделий и конструкций»  
E-mail: m\_akulova@mail.ru

### **Ольга Владимировна Селиверстова**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант  
Тел.: +7 904 034 00 08  
E-mail: tds\_tp@mail.ru

M. AKULOVA, O. SELIVYORSTOVA

## THE INFLUENCE OF COMPLEX AIR-ENTRAINING PLASTICIZER ON THE PROPERTIES OF CEMENT PASTE AND THE STRENGTH OF CEMENT STONE OF DIFFERENT MINERALOGICAL COMPOSITION

*Research in the influence of complex air-entraining plasticizer on the properties of cement systems with different content of tricalcium aluminate has been made. We studied the influence of the amount of additive on the rheological properties of cement paste, the dependence of hydration and kinetics of cement paste hardening, as well as the dependence of its physical and mechanical characteristics on tricalcium aluminate content in cements.*

**Keywords:** cement paste, tricalcium aluminate  $C_3A$ , complex plasticizer.

### BIBLIOGRAPHY

1. Batrakov, V. G. Modifitsirovannye betony. Teoriia i praktika [Tekst] / V.G. Batrakov. – M., 1998. – S. 167-171.
2. Stroitel'noe materialovedenie [Tekst]: ucheb. posobie. – Rostov n/D: Feniks, 2010. – S. 287-290.
3. Izotov, V.S. Khimicheskie dobavki dlia modifikatsii betona [Tekst] / V.S. Izotov, Iu.A. Sokolova. – M.: Paleotip, 2006. – S. 26-28.
4. Zotkin, A.G. Beton i betonnye konstruksii [Tekst] / A.G. Zotkin. – Rostov n/D: Feniks, 2012. – 168 s.
5. GOST 30515-97 Tsementy. Obshchie tekhnicheskie usloviia [Tekst]. – M., 1998. – 2 s.

#### **M. Akulova**

Ivanovo state university of architecture and building, Ivanovo

Doctor of technical science, professor, head of the department «Production of building materials, products and designs»

E-mail: m\_akulova@mail.ru

#### **O. Selivyorstova**

Ivanovo state university of architecture and building, Ivanovo

Post graduate student

Ph.: +7 904 034 00 08

E-mail: tds\_tp@mail.ru

ЛУКУТЦОВА Н.П., КУЛЕШ И.А., МАЦАЕНКО А.А.

## СНИЖЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Рассмотрены технологические приемы, снижающие радиоактивность природного и техногенного сырья при производстве строительных материалов. Представлены результаты удельной эффективной активности естественных радионуклидов сырья после отсеивания пылеватых частиц, мелких фракций, декантирования и разбавления сырьевых компонентов.*

**Ключевые слова:** природное и техногенное сырье, удельная эффективная активность естественных радионуклидов, строительные материалы, отсеивание пылеватых частиц и мелких фракций, декантирование, разбавление.

Главными источниками поступления в строительные материалы естественных радионуклидов являются минералы и горные породы, происхождение которых неразрывно связано с включением в их состав всех радиоактивных элементов, возникших в период формирования и развития планеты. Все строительные материалы содержат в своем составе естественные радионуклиды, принадлежащие семействам урана-238, тория-232 и калия-40 [1, 2].

Несмотря на то, что радиоактивные элементы встречаются в тех или иных количествах повсеместно, распределение их в земной коре очень неравномерно. Наиболее высокие концентрации урана свойственны изверженным (магматическим) породам, в особенности гранитам. Высокие концентрации урана также могут быть приурочены к темноцветным сланцам, осадочным породам, содержащим фосфаты, а также метаморфическим породам, образовавшимся из этих отложений. Естественно, что и почвы и обломочные отложения, образовавшиеся в результате переработки вышеназванных пород, также будут обогащены ураном.

По радиоактивности породообразующие минералы подразделяют на четыре группы.

1. Наибольшей радиоактивностью отличаются минералы урана (первичные – уранит, настуран, вторичные – карбонаты, фосфаты, сульфаты уранила и др.), тория (торианит, торит, монацит и др.), а также находящиеся в рассеянном состоянии элементы семейства урана, тория и др.

2. Высокой радиоактивностью характеризуются широко распространенные минералы, содержащие калий-40 (полевые шпаты, калийные соли).

3. Средней радиоактивностью отличаются такие минералы, как магнетит, лимонит, сульфиды и др.

4. Низкой радиоактивностью обладают кварц, кальцит, гипс, каменная соль и др. В этой классификации радиоактивность соседних групп возрастает примерно на порядок.

Радиоактивность горных пород определяется радиоактивностью породообразующих минералов. В зависимости от качественного и количественного состава минералов, условий образования, возраста и степени метаморфизма их радиоактивность изменяется в широких пределах. К практически нерадиоактивным относятся такие осадочные породы как ангидрит, гипс, каменная соль, известняк, доломит, кварцевый песок и др., а также ультраосновные, основные и средние породы. Средней радиоактивностью отличаются кислые изверженные породы, а из осадочных – песчаник, глина и особенно тонкодисперсный морской ил, обладающий способностью адсорбировать радиоактивные элементы, растворенные в воде. В земных объектах уран и торий могут входить в заметных количествах в кристаллические решетки ряда минералов в виде изоморфной примеси и даже образовывать самостоятельные урановые и ториевые минералы, в которых эти элементы являются главными компонентами. Важнейшими урановыми минералами являются безводные его оксиды. При преобладании в составе минерала оксидов 4-валентного урана он называется уранитом, при преобладании 6-валентного урана – урановой смолкой. Эти минералы имеют черный цвет и характерный смоляной блеск в свежем изломе.

К важнейшим ториевым минералам относятся торианит (безводный оксид тория), торит (силикат тория) и монацит (безводный фосфат церия, в котором содержание тория достигает иногда 28%). Монацит – очень устойчивый минерал и при разрушении породы переходит в россыпи. Монацитовые пески являются важным источником для извлечения тория и редких земель. Уран значительно более подвижен, чем торий, и при разрушении минералов мигрирует в растворенном состоянии, образуя затем серию вторичных минералов, объединяемых под общим названием «урановые слюдки». Эти минералы легко растворимы и характеризуются отсутствием у них радиоактивного равновесия.

Радий – элемент весьма подвижный, что объясняется положением его в кристаллической решетке урановых минералов: образуясь из урана путем трех актов  $\alpha$ -распада, Ra находится не в узлах кристаллической решетки, а в межузловых промежутках кристалла. Поэтому он легко попадает в поры, трещины и другие нарушения кристалла и выщелачивается водой или растворами. В результате равновесие радий-уран может быть существенно сдвинуто.

Как показали ранее выполненные исследования [3-5], при производстве строительных материалов и изделий содержание естественных радионуклидов в зависимости от состава сырья и особенностей технологических процессов может оставаться без изменений, возрастать или снижаться. Однако без применения дополнительных технологических приемов содержание естественных радионуклидов в сырье, как правило, не уменьшается.

К технологическим приемам, позволяющим снизить радиоактивность природного и техногенного сырья при производстве строительных материалов можно отнести следующие: отсеивание пылеватых, илистых и глинистых частиц и фракций менее 0,16 мм, декантирование водой (например, гранитного щебня) или растворами слабых кислот с концентрацией 0,03-0,3%, разбавление сырьем с низкой концентрацией естественных радионуклидов (рис. 1).



Рисунок 1 – Технологические приемы снижения содержания естественных радионуклидов в сырье для производства строительных материалов

Установлено, что при дроблении каменных пород и техногенного сырья происходит обогащение естественными радионуклидами наиболее мелких фракций обрабатываемых материалов (табл. 1). Причем наиболее интенсивно происходит обогащение радием-226.

Это объясняется термофлуктуационными явлениями при силовых и тепловых воздействиях на твердые тела, одно из проявлений которого отражено в теории Н.С. Журкова. В данном случае фактором, способствующим обогащению мелких фракций естественными радионуклидами, является наложение на колебательную тепловую энергию связей между частицами твердого тела энергии радиоактивного распада, что способствует дополнительному разупрочнению связей при дроблении, обжиге и сушке. В связи с этим рекомендуется удалять мелкие отсеивы дробления и пыль-уноса вращающихся печей и сушилок из сырьевых смесей, что позволяет снизить содержание естественных радионуклидов в готовом продукте на 15-40%.

Таблица 1 – Влияние фракционного состава на удельную эффективную активность сырьевых компонентов

Наименование материала	Фракция, мм	Активность, Бк/кг			Удельная эффективная активность, Бк/кг
		<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	
Пески обогащения фосфоритного производства	0,315	78,2	9,4	227,9	109,9
То же	0,16	174,2	10,8	277,2	212,0
То же	<0,16	210,3	11,4	324,6	252,8
Зола-уноса	0,16	155,2	128,4	279,6	347,2
То же	0,071	188,1	130,8	288,2	384,0
То же	<0,071	247,0	134,0	294,1	447,5

Уменьшение фракции песка обогащения фосфоритного производства от 0,315 до <0,16 мм приводит к увеличению содержания радия-226 от 78,2 до 210,3 Бк/кг, т.е. в 2,7 раза; тория-232 – от 9,4 до 11,4 Бк/кг, т.е. в 1,2 раза; калия – 40 – от 227,9 до 324,6 Бк/кг, т.е. в 1,4 раза, удельной эффективной активности ЕРН от 109,9 до 252,8 Бк/кг, т.е. в 2,3 раза. Для золы-уноса Брянской ГРЭС наблюдается аналогичная зависимость. Уменьшение фракции золы-уноса с 0,16 до <0,071 мм приводит к возрастанию содержания радия-226 с 155,2 до 247,0 Бк/кг, т.е. в 1,6 раза, тория-232 – с 128,4 до 134,0 Бк/кг; калия – 40 с 279,6 до 294,1 Бк/кг, т.е. 1,1 раза, эффективной удельной активности ЕРН с 347,2 до 447,5 Бк/кг, т.е. в 1,3 раза. При этом зола-уноса из сырьевого компонента, относящегося к I-му классу по радиационной безопасности, попадает во II-ой класс, запрещающий ее использование для получения строительных материалов для жилых и общественных зданий. Установлено, что естественные радионуклиды могут содержаться в природном и техногенном сырье в различных формах. В ряде случаев происходит изоморфное замещение ионов кремния и возможно алюминия и железа ионами тория и радия. При этом радионуклиды распределяются в объеме частиц заполнителя, поэтому практически не поддаются декантированию водой и растворителями слабых кислот.

В ряде случаев естественные радионуклиды адсорбируются совместно с соединениями Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> и др. на поверхности кварцевых частиц, в трещинах и порах либо в составе тонкодисперсной глинистой фракции. В этом случае можно в значительной степени понизить их содержание декантированием водой либо растворами слабых кислот. При декантировании водой, например, песка обогащения фосфоритного производства удельная эффективная активность естественных радионуклидов уменьшается на 30-33%, а при промывании раствором соляной кислоты 0,03-0,3% – на 50-56% (табл. 2). На способ снижения содержания естественных радионуклидов в строительных материалах получен патент [6].

Таблица 2 – Влияние вида обработки природного и техногенного сырья на изменение радионуклидного состава

Вид обработки	Удельная активность радионуклида, Бк/кг			Удельная эффективная активность, A <sub>эфф</sub> , Бк/кг
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	
Пески обогащения фосфоритного производства				
Контрольная проба	83,7	9,8	245,0	117,4
Вода	63,4 (24%)	0 (100%)	181,1 (26%)	78,8 (33%)
HCl 0,03%	45,8 (45%)	0 (100%)	161,0 (34%)	59,5 (50%)
HCl 0,3%	39,6 (53%)	0 (100%)	142,8 (42%)	51,7 (56%)
Зола-уноса				
Контрольная проба	170,8	159,0	258,0	401,0
HCl 0,03%	88,7 (48%)	92,2 (42%)	89,9 (65%)	217,1 (46%)
HCl 0,3%	71,1 (58%)	91,7 (42%)	79,5 (69%)	198,0 (51%)
Уксусная кислота 0,5%	57,6 (66%)	61,5 (61%)	196,5 (24%)	154,9 (61%)
Щебень гранитный с отсеянной фракцией менее 0,16 мм				
Контрольная проба	145,1	92,4	1329,0	379,1
Вода	134,0 (8%)	88,3 (4%)	1298,0 (2%)	360,3 (5%)
Щебень гранитный				
Контрольная проба	163,6	97,2	1390,0	409,1
Отсев фракции менее 0,16 мм	138,4 (22%)	89,8 (7)	1154 (17)	354,1 (13%)

**Примечание:** в скобках приводится процент снижения содержания естественных радионуклидов (по сравнению с контрольной пробой) после соответствующей обработки.



Декантирование заполнителя водой перед подачей в смеситель для приготовления бетона приводит к удалению тонкодисперсной глинистой фракции, которая, например, для песков обогащения фосфоритного производства, в большей степени содержит торий-232 по сравнению с другими радионуклидами. При этом содержание радия-226 уменьшается с 83,7 до 63,4 Бк/кг, т.е. на 24%; тория-232 с 9,8 до 0 Бк/кг, т.е. на 100%; калия-40 с 245 до 181 Бк/кг, т.е. на 26% и эффективной удельной активности с 117,4 до 78,8 Бк/кг, т.е. на 33%, по сравнению с первоначальным их содержанием.

При взаимодействии соляной кислоты с солями радия-226, тория-232 и калия-40 образуются водорастворимые формы хлорида радия-226, тория-232 и калия-40 и происходит их вымывание с поверхности заполнителя. Хлорид радия  $RaCl_2$  имеет растворимость 25 г на 100 г воды (при 20°C),  $ThCl_4$  – 55,6 г на 100 г воды (при 0°C),  $KCl$  – 34,6 г на 100 г воды (при 20°C).

Аналогичные явления наблюдаются в золе-уноса. Частицы золы Брянской ГРЭС состоят из кластеров – сцементированных частиц, в которых преобладает тонкодисперсная глинистая фракция. При обработке золы 0,03-0,3% раствором соляной кислоты в течение 5-10 минут происходит растворение обогащенного радионуклидами поверхностного слоя, что приводит к снижению естественных радионуклидов основной массы золы до 46-51%. Из золы-уноса наиболее интенсивно происходит удаление радия-226, и калия-40.

Увеличение концентрации соляной кислоты с 0,03 до 0,3% при обработке золы-уноса, как и для песка обогащения фосфоритного производства, незначительно уменьшает содержание радионуклидов: радия-226 от 88,7 Бк/кг до 71,1, тория-232 от 92,2 до 91,7 Бк/кг, калия-40 от 89,9 до 79,5 Бк/кг, удельной эффективной активности с 217,1 до 198,0 Бк/кг. Что вероятно связано с тем, что остальная часть радионуклидов входит в состав кристаллической решетки, то есть находится в объеме материала.

Декантирование раствором соляной кислоты 0,03-0,3% позволяет снизить удельную эффективную активность с 401 до 217,1 Бк/кг, т.е. перевести золу-уноса из сырьевых компонентов, принадлежащих ко II-му классу по радиационной безопасности в I-й в соответствии с ГОСТ 30108 [7].

Разбавление сырья более «чистыми» компонентами является более простым и доступным способом снижения удельной эффективной активности естественных радионуклидов (табл. 3).

Таблица 3 – Изменение эффективной удельной активности ЕРН золы в зависимости от содержания добавки кварцевого песка

Показатели	Содержание кварцевого песка с удельной эффективной активностью ЕРН 30 Бк/кг, %				
	0	20	40	60	80
Удельная эффективная активность ЕРН золы, Бк/кг	654,5	516,7	331,4	215,2	129,6

Так при добавлении к золе удельной эффективной активностью 654,5 Бк/кг 40% кварцевого песка с  $A_{эфф}=30$  Бк/кг, содержание ЕРН смеси снижается до 331,4 Бк/кг, т.е. в 2 раза, а при 60% – до 215,2 Бк/кг, т.е. в 3 раза.

Поэтому рекомендуемыми способами снижения содержания естественных радионуклидов в сырьевых компонентах являются: декантирование водой, слабыми растворами соляной кислоты, отсев и удаление пылеватых частиц и мелких фракций, а также разбавление сырьем с низким содержанием ЕРН (табл. 3).

Таблица 4 – Рекомендуемые способы снижения содержания естественных радионуклидов в природном и техногенном сырье

Природное или техногенное сырье	Характер распределения ЕРН	Рекомендуемый способ снижения содержания ЕРН	Эффективность применения рекомендуемого способа
Гранитный щебень	В объеме частиц щебня и частично на поверхности в глинистой составляющей	Декантирование водой	До 20%
		Отсев и удаление фракции менее 5 мм	До 20%
		Разбавление	1,3-2 раза
Песок кварцевый	В объеме и адсорбированном виде на поверхности, в глинистой составляющей, в трещинах, в виде примесей	Декантирование водой	30% и более
		Декантирование раствором соляной кислоты 0,03% концентрации	Более 50%
		Отсев и удаление фракции менее 0,16 мм	До 20%
Песок обогащения фосфоритного производства	В объеме частиц кварцевых и полевошпатных зерен, в адсорбированном виде в трещинах и пр.	Декантирование водой	30% и более
		Декантирование раствором соляной кислоты 0,03% концентрации	Более 50%
		Разбавление	1,2-2 раза
Зола-уноса	В объеме оплавленных частиц золы и на поверхности в адсорбированном виде	Отсев и удаление фракции менее 0,16 мм	До 20%
		Декантирование раствором соляной кислоты 0,03% концентрации	Более 50%
		Разбавление	1,2-3 раза

Следовательно, на стадии подготовки сырьевых компонентов при производстве строительных материалов в зависимости от его вида, химического и минерального состава, а также дисперсности содержание естественных радионуклидов можно снизить, получая безопасное сырье, соответствующее требованиям ГОСТ 30108.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крисюк, Э.М. Эффективная удельная активность природных радионуклидов в материалах [Текст] / Э.М. Крисюк // АНРИ, 2001. – № 4(27). – С. 4-8.
2. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений [Текст] / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
3. Лукутцова, Н.П. Строительные материалы в экологическом аспекте [Текст] / Н.П. Лукутцова. – Брянск: БГИТА. – 215 с.
4. Лукутцова, Н.П. Снижение радиоактивности сырья и строительных материалов [Текст] / Н.П. Лукутцова. – Брянск: БГИТА, 2010. – 196 с.
5. Лукутцова, Н.П. Радиационная безопасность строительных материалов и промышленных отходов [Текст] / Н.П. Лукутцова, О.Ю. Козлов, Г.Н. Крупный и др. // Атомная энергия. – 2001. – т. 90. – С. 277-284.
6. Патент на изобретение № 2275344 С 04В 28/04. Способ приготовления строительного раствора / Н.П. Лукутцова. Заявлено 05.10.04; опубл. 27.04.2006, Бюл., №14.
7. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов [Текст], М.: Изд-во стандартов, 1995. – 11 с.

#### Лукутцова Наталья Петровна

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск

Доктор технических наук, профессор кафедры «Производство строительных конструкций»

Тел.: +7 915 801 44 19

E-mail: natluk58@mail.ru

**Кулеш Ирина Алексеевна**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия»

Тел.: +7 905 100 77 46

E-mail: irina.kulesh@gmail.com

**Мацаенко Анастасия Александровна**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск

Магистрант

Тел.: +7 915 801 09 51

E-mail: macichka@yandex.ru

---

N. LUKUTCOVA, I. KULESH, A. MACAENKO

**REDUCTION OF RADIOACTIVITY OF NATURAL  
AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS  
FOR CONSTRUCTION MATERIALS**

*The paper considers some technological methods that reduce the radioactivity of natural and man-made materials in the production of building materials. The authors present the results of the specific effective activity of natural radionuclides in raw materials after sifting dust particles and fine particles, decanting and dilution.*

**Keywords:** *natural and man-made materials, the specific effective activity of natural radionuclides, construction materials, sifting dust particles and fine particles, decanting, dilution.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kriusiuk, E.M. Effektivnaia udel'naia aktivnost' prirodnykh radionuklidov v materialakh [Tekst] / E.M. Kriusiuk // ANRI, 2001. – № 4(27). – S. 4-8.
2. Kriusiuk, E.M. Radiatsionnyi fon pomeshchenii [Tekst] / E.M. Kriusiuk. – M.: Energoatomizdat, 1989. – 120 s.
3. Lukutsova, N.P. Stroitel'nye materialy v ekologicheskom aspekte [Tekst] / N.P. Lukutsova. – Bryansk: BGITA. – 215 s.
4. Lukutsova, N.P. Snizhenie radioaktivnosti syr'ia i stroitel'nykh materialov [Tekst] / N.P. Lukutsova. – Bryansk: BGITA, 2010. – 196 s.
5. Lukutsova, N.P. Radiatsionnaia bezopasnost' stroitel'nykh materialov i promyshlennykh otkhodov [Tekst] / N.P. Lukutsova, O.Iu. Kozlov, G.N. Krupnyi i dr. // Atomnaia energiya. – 2001. – t. 90. – S. 277-284.
6. Patent na izobretenie № 2275344 S 04V 28/04. Sposob prigotovleniia stroitel'nogo rastvora / N.P. Lukutsova. Zaiavleno 05.10.04; opubl. 27.04.2006, Biul., №14.
7. GOST 30108-94. Materialy i izdeliia stroitel'nye. Opredelenie udel'noi effektivnoi aktivnosti estestvennykh radionuklidov [Tekst], M.: Izd-vo standartov, 1995. – 11 s.

**N. Lukutsova**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk

Doctor of technical science, professor, head of the department «Production of construction designs»

Ph.: +7 915 801 44 19

E-mail: natluk58@mail.ru

**I. Kulesh**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk

Candidate of technical sciences, associate professor of the department «Chemistry»

Ph.: +7 905 100 77 46

E-mail: irina.kulesh@gmail.com

**A. Macaenko**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk

Master student

Ph.: +7 915 801 09 51

E-mail: macaenko32@yandex.ru

СОЛОМЕНЦЕВ А.Б., КУЛИКОВА А.В., БУХТИЯРОВ С.В.

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ДОРОЖНОГО БИТУМА С РАЗЛИЧНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ И АСФАЛЬТОВЯЖУЩЕГО НА ЕГО ОСНОВЕ

*Охарактеризованы три группы полимерных добавок: на основе синтетических восков, термопласты и термоэластопласты. Приведены сведения об используемых полимерных добавках, определено время их распределения в дорожном битуме, сцепление битума с добавками с кислыми горными породами. Определена динамическая вязкость битума с полимерными добавками при различных температурах. Определены физико-механические показатели и уплотняемость асфальтовяжущего с различными полимерными добавками. Установлено, что введение добавок на основе синтетических восков улучшает уплотняемость асфальтовяжущего при пониженных температурах.*

**Ключевые слова:** дорожные битумы, асфальтобетон, воски синтетические, термопласты, термоэластопласты, асфальтовяжущее, теплые асфальтобетонные смеси, уплотняемость асфальтовяжущего.

Влияние полимерных добавок на битумы, т.е. их функциональное назначение, проявляется в увеличении температуры размягчения, вязкости, в снижении температуры хрупкости. Термоэластопласты увеличивают эластичность битума и снижают трещиностойкость асфальтобетона, синтетические воски снижают температуру перехода битума в хрупкое состояние и позволяют производить уплотнение асфальтобетона при пониженных температурах воздуха. Важными показателями являются также растворимость добавок в битуме, сцепление битума с добавками с кислыми горными породами, характер изменения вязкости битума с добавками при различных температурах, оценка уплотняемости асфальтобетона на битуме с полимерными добавками.

Оценка свойств битума с добавками и уплотняемости асфальтовяжущего осуществлялась для трех групп полимерных добавок, а именно: добавок на основе синтетических восков, термопластов (полиолефины и вторичный полиэтилен), дивинилстирольных термоэластопластов.

Воски полностью синтетические получают действием водорода на окись углерода по реакции Фишера-Тропша [1]. Образующиеся продукты состоят главным образом из высших алканов (предельных углеводородов). Широкое применение также находят синтетические воски, состоящие из смеси полиолефинов (алкатыны, виннотены, луполены) с молекулярной массой от 2000 до 10 000, степенью кристалличности от 10 до 85%, плотностью от 0,9 до 0,94 г/см<sup>3</sup>, вязкостью расплава при 140°C от 850 до 10 000 сПз [1]. В зависимости от молекулярной массы и кристалличности эти синтетические воски могут находиться в различном агрегатном состоянии (от жидкого до твердого). В последние годы добавки для дорожных битумов, содержащие жидкие парафины (предельные углеводороды) и синтетические воски в твердом состоянии применяются для получения теплых асфальтобетонных смесей с целью снижения температуры перемешивания, укладки и уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, а также для повышения удобоукладываемости литых асфальтобетонных смесей [2, 3].

Добавка Honeywell Titan 7686 производится компанией Honeywell (США) и представляет собой окисленный полиэтилен низкого давления с молекулярной массой 5 000–15 000, внешний вид – порошок средней крупности белого цвета, температура размягчения – 115–140°C, плотность – 0,9 г/см<sup>3</sup>, рекомендуемая дозировка – 0,8–3,0% от массы битума (здесь и далее сведения о добавках приводятся из информационных материалов и презентаций компаний-производителей). Добавка Rediset WMX производится компанией AkzoNobel (Швеция) и состоит на 30–60% из трис(2-гидроксиэтила) гидрогенизированного N-алкилдиаминпропана животного жира и на 20% из парафинового и углеводородного воска. По внешнему виду это гранулы от светло- до темно-коричневого цвета полусфероидальной (чешуеобразной) формы,

температура размягчения 80-95°C, рекомендуемая дозировка – 1,0-2,0% от массы битума. Добавка Palmoxa производится компанией KLK OLEO (Малайзия) и представляет собой этилен бис стеарамид (EBS), N,N'-этилен (стеарамид), с содержанием амида больше 96% и температурой плавления больше или равной 140°C, рекомендуемая дозировка 0,2-4,5%.

Группу термопластов (полиолефины и вторичный полиэтилен) представляют полимерные добавки РТЭП и Superplast. Полиолефины – продукты полимеризации непредельных углеводородов олефинового ряда (этилен, пропилен, бутилен и др.) [4]. Молекулы полиолефинов – это обычно длинные линейные цепи с небольшим количеством коротких и длинных боковых ответвлений. В [5] приводится более точное определение полиолефинов: олефинов полимеры – высокомолекулярные соединения, образующиеся при гомо- или сополимеризации олефинов. Существенным недостатком олефинов полимеров является плохая адгезия, обусловленная отсутствием полярных групп, и сравнительно невысокая жесткость, из-за которой ограничивается применение этих полимеров как конструкционных материалов [5]. Все представители полиолефинов – термопластичные линейные полимеры с плотностью при 20°C ниже 1 г/см<sup>3</sup>, наиболее тугоплавкий полимер – полиэтилен, наименее тугоплавкий – изотактический полипропилен. Их применение в асфальтобетоне представляет значительные трудности в обеспечении однородности системы при технологических температурах [6]. Эти полимеры не имеют двойных связей, следовательно, они устойчивы против старения. Они трудно диспергируются в битуме. Полиолефины характеризуются низкой реакционной способностью, они не вступают в реакцию с битумами [6]. После введения в битум и перемешивания они образуют дисперсию. Смесь битума с полимером очень нестабильна.

Добавка РТЭП производится компанией «ДорТрансНИИ РГСУ» (Россия) и представляет собой многокомпонентную композицию на основе полиолефинового полимерного носителя, содержащую битум. По внешнему виду это гранулы черного цвета произвольной формы размером 2-6 мм (допускается пористость), температура размягчения не выше 140°C, рекомендуемая дозировка – 0,35% от массы минеральной части асфальтобетона или 5-6% от массы битума. Добавка Superplast производится компанией ITERNIMICA (Италия) и представляет собой смесь переработанных из вторичного сырья полимеров этилена. По внешнему виду это гранулы серого цвета цилиндрической формы диаметром 3 мм и длиной около 4 мм, температура размягчения составляет 130-150°C, рекомендуемая дозировка – 4,0-8,0% от массы битума.

Третью группу дивинилстирольных термоэластопластов представляют полимерные добавки ДСТ-30-01 и Kibiton PB-5301. Термоэластопласты (термопластичные эластомеры) представляют собой полимерные материалы, которые в условиях эксплуатации способны, подобно эластомерам, к большим обратимым деформациям, а при повышенных температурах, в частности при переработке в изделия, текут подобно термопластам [7]. Термоэластопласты представляют собой блоксополимеры типов АВА и (АВ)<sub>n</sub>, где А – жесткие блоки термопластов (например, полистирольные, полиэтиленовые, полипропиленовые, полиакриловые), В – гибкие эластомерные блоки (например, полибутадиеновые, полиизопреновые, сополимерные – бутадиен-стирольные, изопрен-стирольные, этилен-пропиленовые).

Добавка ДСТ-30-01 производится ОАО «Воронежсинтезкаучук» (Россия) и представляет собой линейный блоксополимер на основе стирола и бутадиена с содержанием связанного стирола 30% по массе. По внешнему виду это гранулы или порошок от белого до светло-бежевого цвета, показатель текучести расплава (при температуре 190°C и нагрузке 5 кгс) менее 1 г/10 мин, плотность 0,93 г/см<sup>3</sup>, молекулярная масса от 60 000 до 90 000. Добавка Kibiton PB-5301 производится компанией CHI MEI (Тайвань) и представляет собой сополимер на основе стирола и бутадиена. По внешнему виду это пористые гранулы белого цвета, показатель текучести расплава (при 200°C и нагрузке 5 кгс) менее 0,5 г/10 мин, плотность – 0,94 г/см<sup>3</sup>.

В таблице 1 приведены данные по времени распределения добавок в битуме (при распределении их вручную) и по сцеплению ПБВ с кислым минеральным материалом. Добавки синтетических восков быстро и легко, за 5-10 минут, распределяется в битуме, РТЭП за 4 часа, Superplast за 12 часов, ДСТ-30-01 и Kibiton PB-5301 за 6 часов. Следует отметить, что процесс взаимодействия термопластичных добавок РТЭП и Superplast с битумом при их перемешивании при температуре 160°C заключается в их расплавлении и механическом распределении в объеме жидкого битума. После прекращения перемешивания на поверхности битума образу-

ется высоковязкий расплавленный полимерный слой. Это объясняется более низкой плотностью полиолефинов. Взаимодействия между компонентами битума и макромолекулами и надмолекулярными образованиями полимеров полиолефинов слабые, битум как бы «выталкивает» полимерную фазу на поверхность. Поэтому на практике гранулированные добавки на основе полиолефинов вводятся не в битум, а в приготавливаемую асфальтобетонную смесь с использованием технологической линии подачи стабилизирующих добавок [8].

Таблица 1 – Время распределения полимерных добавок в битуме и сцепление ПБВ с кислым минеральным материалом

№ п/п	Наименование материала	Расход в битуме, % от массы битума	Время распределения полимера в битуме	Показатель сцепления, соответствие контрольному образцу по ГОСТ 11508-74
1	БНД 60/90	--	--	По образцу 3
2	Honeywell Titan 7686	1,5	8-10 минут	2 →1
3	Rediset WMX	1,5	10 минут	По образцу 3
4	Palmowax	1,5	5-6 минут	По образцу 3 (почти полное отслаивание)
5	РТЭП	5,5	4 часа	По образцу 3
6	Superplast	5,0	12 часов	По образцу 3
7	ДСТ-30-01	3,5	6 часов	По образцу 3
8	Kibiton PB-5301	3,5	6 часов	По образцу 3

Как видно из таблицы 1, добавка Honeywell TITAN 7686 улучшает сцепление, наблюдается почти полное покрытие образца после кипячения, Rediset WMX не улучшает, а Palmowax ухудшает. Термопласты и термоэластопласты также не улучшают сцепления. Как отмечается в работе [9], в последние годы окисление все шире используется в качестве метода модифицирования полиолефинов. Окисление при нагревании позволяет вводить в состав полиэтилена кислородсодержащие группы, основную долю которых составляют карбонильные, гидроперекисные и эфирные группы. Окисление под действием ионизирующих излучений [9] используется для повышения адгезионной способности полиэтилена. Условия процесса облучения могут быть подобраны таким образом, что значительное повышение адгезии в результате образования в поверхностном слое полярных кислородсодержащих групп достигается практически при сохранении остальных свойств полимера.

Изменения надмолекулярной структуры в результате окисления расплава линейного полимера исследовали Бальтенас и Бальтене [9]. Уже незначительные химические превращения в расплаве приводят к существенным изменениям надмолекулярной структуры в охлажденном после окисления полимере. Продолжение окисления, сопровождающееся сшиванием макроцепей (в основном кислородсодержащими мостиками) и накопление труднокристаллизующихся продуктов окисления, приводит ко все большей аморфизации полиэтилена.

Для изучения реологических свойств дорожного битума с добавками использовался программируемый ротационный вискозиметр BROOKFIELD RVDV-II+PRO. Данный вискозиметр производится в США фирмой «Brookfield Engineering Laboratories, Inc» и разрешен Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии к применению на территории России (свидетельство об утверждении типа средств измерений US. С. 31.010.А №42723). Для проведения измерений с дорожным битумом для задания и поддержания требуемой температуры использовалась термоячейка Thermosel со шпинделями SC4-21 и SC4-29 [10].

В таблице 2 приведена динамическая вязкость битума с добавками при температурах от 160 до 70°С в сравнении с битумом без добавок. На рисунке 1 приведены значения динамической вязкости дорожного битума с вышерассмотренными добавками при температурах от 160

до 70°C. Из таблицы 2, а также из рисунка 1 видно, что добавки Rediset WMX и Palmowax не существенно влияют на динамическую вязкость битума, в большей степени влияет добавка Honeywell Titan 7686 (увеличение вязкости в 1,2-2,3 раза), термопласты РТЭП и Superplast увеличивают вязкость битума в 4,6-9,2 раза. Добавки ДСТ-30-01 и Kibiton PB-5301 по увеличению вязкости занимают промежуточное положение между восками и термопластами. Графической иллюстрацией данных по вязкости является приведенные на рисунке 2 значения динамической вязкости битума с полимерными добавками при 160°C, на рисунке 3 – при 110°C, на рисунке 4 – при 70°C.

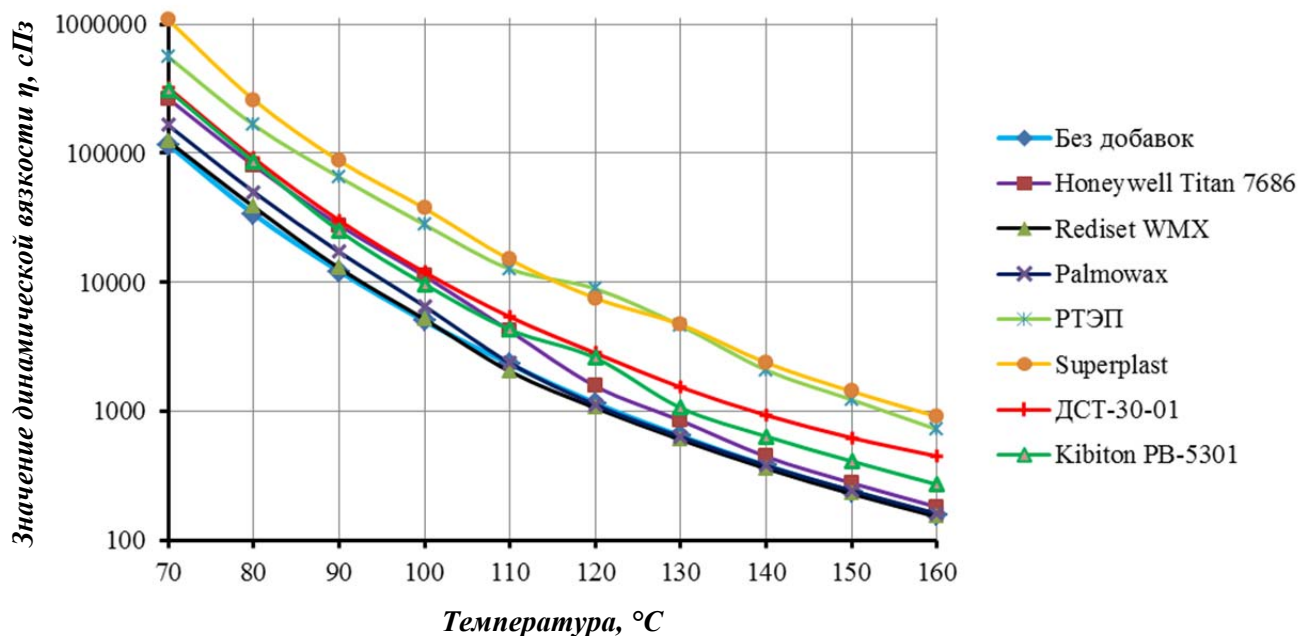


Рисунок 1 – Динамическая вязкость битума с полимерными добавками при различных температурах

Таблица 2 – Динамическая вязкость битума с полимерными добавками при различных температурах

№ п/п	Наименование и количество добавки в битуме, % от массы битума	Значение динамической вязкости, сПа, при заданной температуре, °C									
		160	150	140	130	120	110	100	90	80	70
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Без добавок	157	240	380	645	1160	2320	5013	12200	33800	117000
2	Honeywell Titan 7686	182	279	447	850	1570	4192	11200	27767	80500	265000
3	Rediset WMX	153	230	361	603,3	1065	2040	5180	12900	38500	124000
4	Palmowax	161,5	244	380	633,3	1125	2370	6540	17220	50200	165000
5	РТЭП	725,7	1235	2090	4615	8930	12700	28000	65500	166000	559000
6	Superplast	914	1430	2385	4700	7550	15000	37500	87600	260000	1080000
7	ДСТ-30-01	450	625	935	1540	2833	5400	11983	30200	91500	321000
8	Kibiton PB-5301	272	412	640	1065	2600	4300	9700	25100	86000	308700

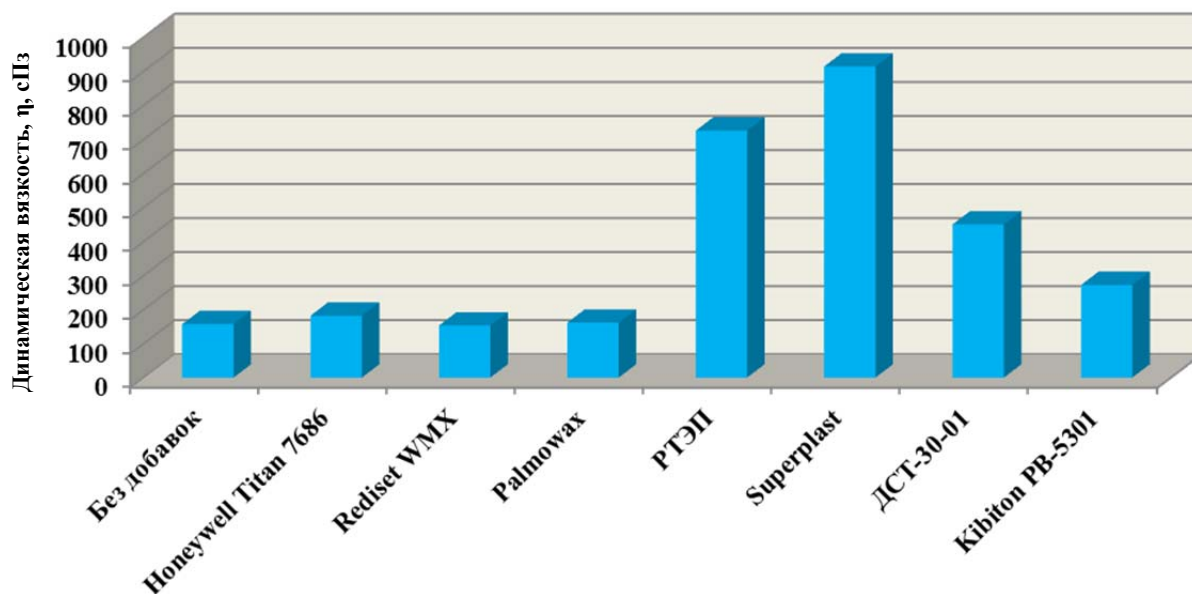


Рисунок 2 – Динамическая вязкость битума с полимерными добавками при 160°C

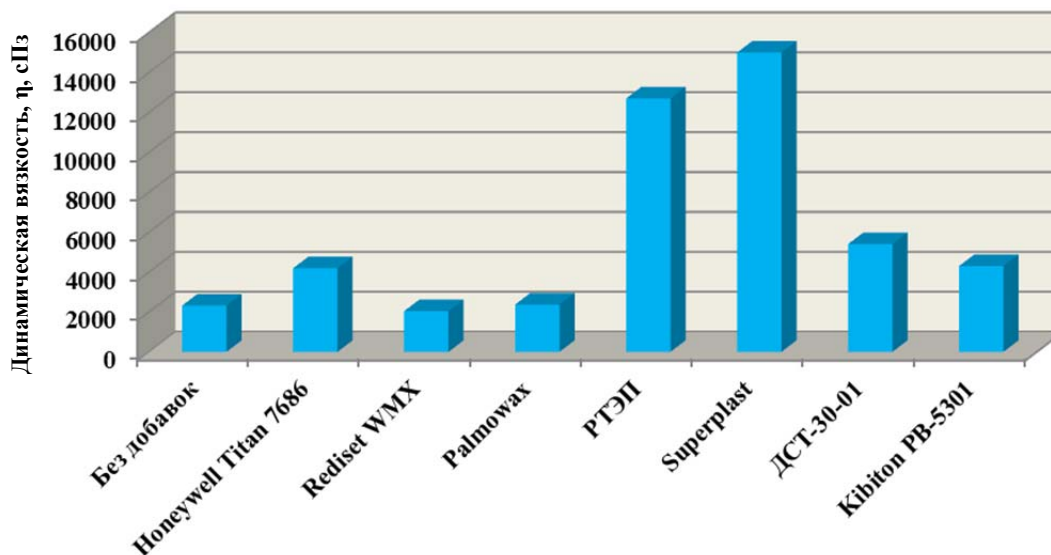


Рисунок 3 – Динамическая вязкость битума с полимерными добавками при 110°C

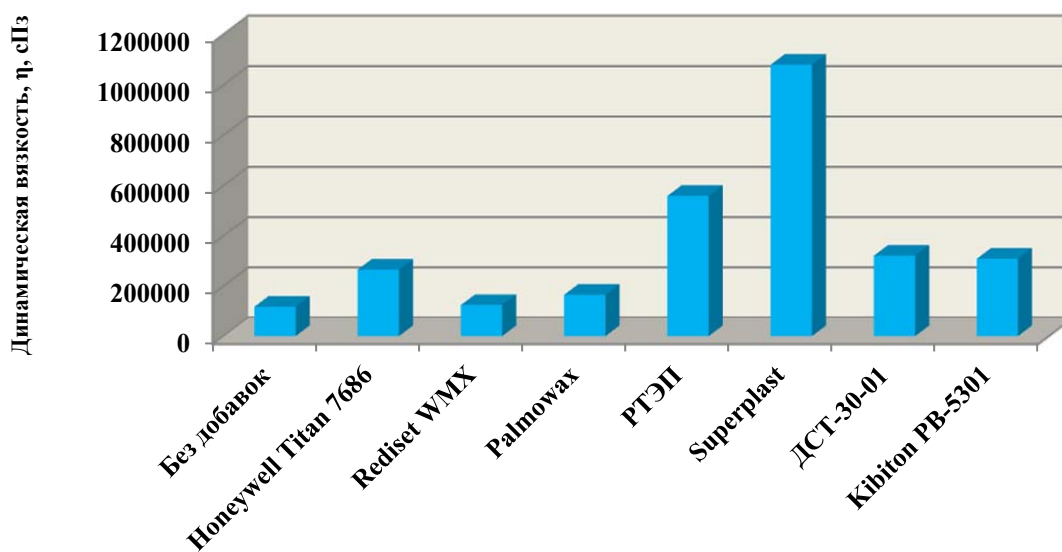


Рисунок 4 – Динамическая вязкость битума с полимерными добавками при 70°C



Уплотняемость теплых асфальтобетонных смесей можно оценить по методу Королева И.В., в основу которого положен процесс деформации образца с циклическим нагружением [11]. В той же работе для оценки уплотняемости использовалась зависимость средней плотности асфальтобетона от температуры уплотнения. В работе [12] уплотняемость щебеночно-мастичной смеси на ПБВ с добавками для теплого асфальтобетона оценивалась с использованием гиратора-компактора.

Уплотняемость щебеночно-мастичной и других асфальтобетонных смесей определяется состоянием и свойствами битумной прослойки между зернами щебня и песка. В битумной прослойке битум с минеральным порошком образуют асфальтовяжущее, которое характеризует микроструктуру асфальтобетона, в том числе и щебеночно-мастичного. Поверхность минерального порошка составляет большую часть общей поверхности минеральной части асфальтобетонной смеси. Таким образом, на частицы минерального порошка приходится большая часть поверхностных взаимодействий с битумом. Это обстоятельство становится особенно существенным при пониженных температурах уплотнения. По изменению физико-механических показателей асфальтовяжущего при уплотнении в разных режимах можно оценивать влияние полимерных добавок на уплотняемость асфальтовяжущего и асфальтобетона. Особый интерес эти данные представляют при оценке уплотняемости при пониженных температурах.

Для приготовления асфальтовяжущего использовался неактивированный доломитовый минеральный порошок ОАО «Доломит» и битум нефтяной дорожный вязкий БНД 60/90 Московского НПЗ. Асфальтовяжущее приготавливали в 10-литровом лабораторном смесителе с подогревом смесительной камеры. Битум нагревался до 150-160°C, в него вводились добавки в заданном процентном соотношении. Смешивание битума с добавками производилось в лабораторном смесителе для приготовления полимерно-битумных вяжущих в течение 3 минут. Минеральный порошок нагревался до температуры 160-170°C и засыпался в смеситель, затем вводился битум с добавками и проводилось смешивание в течение 3 минут для равномерного распределения вяжущего в минеральном порошке.

Предварительно было определено оптимальное количество битума в асфальтовяжущем, при котором достигается его максимальная средняя плотность и прочность. Образцы асфальтовяжущего изготавливались с использованием форм для асфальтобетона  $d=50,5$  мм. Нагрузка на образец составляла 8 тонн, время воздействия нагрузки – 3 минуты. Температура асфальтовяжущего при формовании принималась равной 140°C, так как при температуре формования 140-160°C физико-механические свойства асфальтовяжущего не изменялись. Оптимальное количество битума составило 12% от массы минерального порошка.

Изготовление образцов асфальтовяжущего с различными добавками при различных температурах на начальном этапе производилось при нагрузке на образец  $P=8$  тонн в течение времени  $t=3$  минуты, однако, при данных параметрах уплотнения средняя плотность, водонасыщение и прочность образцов не изменялись в зависимости от температуры их формования. Поэтому для выявления влияния введенных добавок на уплотняемость асфальтовяжущего нагрузка на образец была снижена до 3 тонн, а время уплотнения до одной минуты. Оптимальное количество битума в асфальтовяжущем при этом не изменилось и составило 12% от массы минерального порошка.

В таблице 3 приведены сведения по уплотняемости и физико-механическим показателям асфальтовяжущего при температурах уплотнения 140°C и 50°C. На рисунке 5 приведены значения коэффициента уплотняемости асфальтовяжущего, а на рисунке 6 – значения водонасыщения.

Таблица 3 – Уплотняемость и физико-механические показатели асфальтовяжущего при пониженных температурах с различными полимерными добавками

№ п/п	Наименование и количество добавки в асфальтовяжущем, % от массы битума	Температура уплотнения, T, °С	Средняя плотность, ρ, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент уплотняемости, (K <sub>упл</sub> =ρ <sub>50</sub> /ρ <sub>140</sub> )	Водонасыщение, W, %	Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, R <sub>в</sub> , МПа	Предел прочности при сжатии при 50°С, R <sub>50</sub> , МПа
1	БНД 60/90 без добавок	140	2,28	0,98	0,36	6,20	2,29
		50	2,24		3,93	5,05	1,36
2	Honeywell Titan 7686 - 1,5	140	2,29	0,99	0,77	8,11	3,17
		50	2,27		1,80	6,10	1,85
3	Rediset WMX - 1,5	140	2,30	0,99	0,70	5,99	2,44
		50	2,28		1,90	4,79	1,63
4	Palmowax - 1,5	140	2,28	0,99	1,90	6,95	2,70
		50	2,25		3,90	5,25	1,62
5	РТЭП - 5,5	140	2,25	0,97	3,80	7,28	3,18
		50	2,19		7,00	4,93	2,15
6	Superplast - 5,0	140	2,19	0,97	6,10	6,28	2,97
		50	2,13		9,20	4,91	1,69
7	ДСТ 30-01 - 3,5	140	2,28	0,97	0,80	8,38	3,55
		50	2,21		5,50	5,53	1,99
8	Kibiton PB-5301-3,5	140	2,29	0,98	0,11	7,56	3,67
		50	2,24		2,29	6,41	2,10

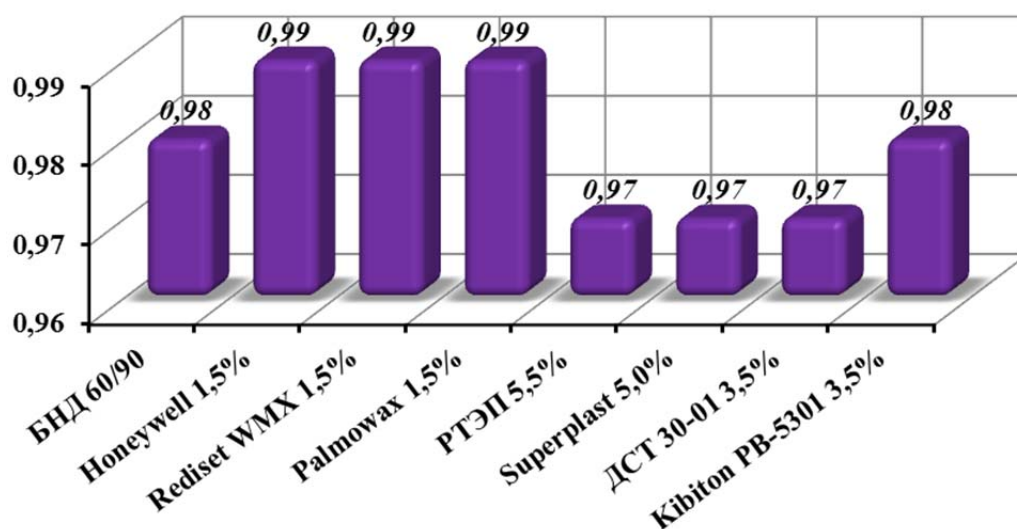


Рисунок 5 – Значения коэффициента уплотняемости асфальтовяжущего с различными полимерными добавками

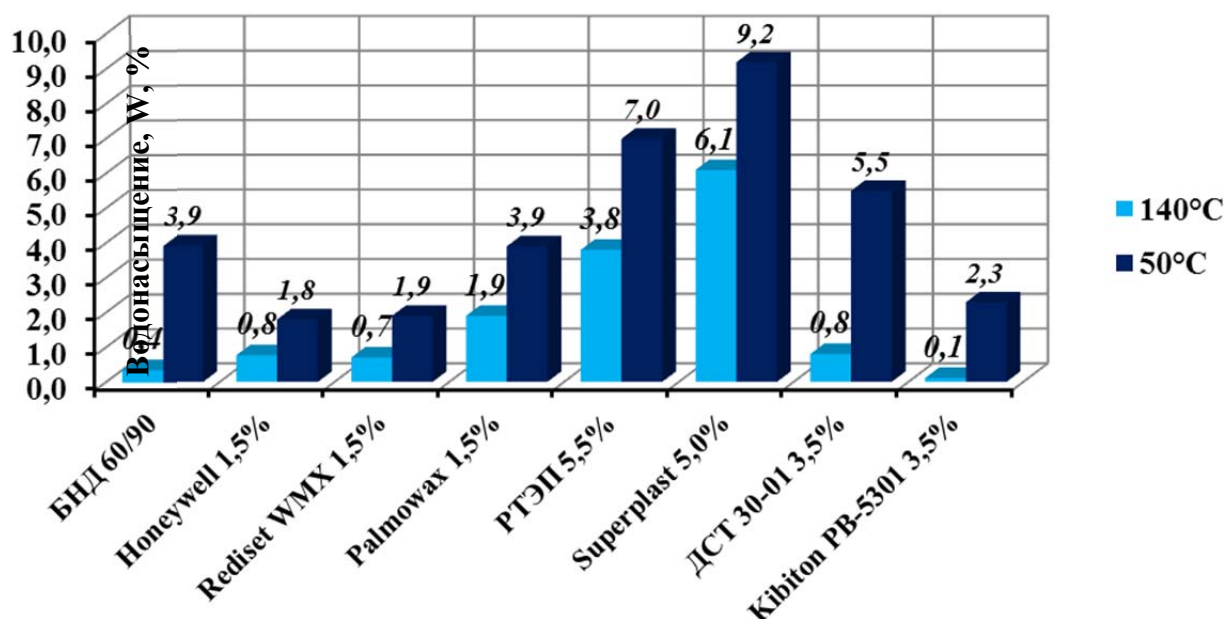


Рисунок 6 – Показатели водонасыщения асфальтовяжущего с различными полимерными добавками, %

Из таблицы 3 и рисунков 5 и 6 видно, что все три добавки на основе синтетических восков – Honeywell Titan7686, Rediset WMX, Palmowax – улучшают уплотняемость асфальтовяжущего при температуре 50°C. При этом Honeywell Titan7686 и Rediset WMX снижают водонасыщение асфальтовяжущего почти вдвое, Palmowax не снижает водонасыщения. Использование добавок РТЭП и Superplast ухудшает уплотняемость асфальтовяжущего при 50°C, а водонасыщение увеличивается с 4 до 7-9%. Добавки термоэластопластов ДСТ-30-01 и Kibiton РВ-5301 по-разному влияют на уплотняемость. Введение ДСТ-30-01 ухудшает уплотняемость асфальтобетона незначительно и водонасыщение увеличивается на 1,5%. Введение добавки Kibiton РВ-5301 не изменяет уплотняемость, уменьшая водонасыщение на 2%.

Таким образом, оценка свойств дорожного битума и асфальтовяжущего с полимерными добавками применительно к использованию в асфальтобетоне позволяет предварительно охарактеризовать их возможности, сильные и слабые стороны, выбрать определенный технологический подход при приготовлении ПБВ и асфальтобетонной смеси, укладке и уплотнении.

Добавки для теплого асфальтобетона на основе синтетических восков хорошо растворяются в битуме, поэтому интенсивного перемешивания для их распределения в рабочих битумных емкостях не требуется. Реологические сопротивления в процессе приготовления асфальтобетонной смеси увеличиваются незначительно, но уплотняемость при пониженных температурах улучшается. Следует отметить многофункциональное действие добавки Honeywell Titan 7686. Она является адгезионной добавкой, добавкой для теплых смесей, а также структурообразующей добавкой, повышающей показатели механической прочности и сдвигоустойчивости асфальтовяжущего и асфальтобетона.

Термопластичные добавки полиолефинов несовместимы с битумом, поэтому они вводятся в асфальтосмеситель при производстве асфальтобетонных смесей. Добавки полиолефинов являются структурообразующими добавками, повышающими показатели механической прочности и сдвигоустойчивости асфальтовяжущего и асфальтобетона. Для использования в верхних слоях покрытий требуется введение адгезионных добавок.

Дивинилстирольные термоэластопласты для их распределения и набухания в битуме требуют использования специального смесительного оборудования. При производстве асфальтобетонных смесей увеличивают реологические сопротивления в битуме и асфальтобетонной смеси. Добавки термоэластопластов являются структурообразующими добавками, повышающими показатели механической прочности и сдвигоустойчивости, а при определенных

значениях снижающими трещиностойкость асфальтовяжущего и асфальтобетона [13]. При использовании в верхних слоях покрытий требуется введение адгезионных добавок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия полимеров, Т.1 [Текст] – М.: «Советская энциклопедия». – 1972. – 515 с.
2. Золотарев, В.А. V конгресс «Евроасфальт–Евробитум» [Текст] / В.А. Золотарев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – №4. – С. 40-41.
3. Покровский, А.В. Применение дефлегматоров [Текст] / А.В. Покровский, Н.В. Майданова // Автомобильные дороги. – 2011. – №5. – С. 120-122.
4. Краткая химическая энциклопедия, Т.4 [Текст] – М.: «Советская энциклопедия». – 1965. – 199 с.
5. Энциклопедия полимеров, Т.2 [Текст] – М.: «Советская энциклопедия». – 1974. – 1032 с.
6. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве PIARC-AIPCR / Перевод с франц. В.А. Золотарева, П.А. Беспаловой. – Харьков.: Изд-во ХНАДУ. – 2003. – 229 с.
7. Энциклопедия полимеров, Т.3 [Текст] – М.: Советская энциклопедия. – 1977. – 638 с.
8. Патент №2474595 РФ, МПК7 C08L 95/00, C04B, C04B 24/12, C08K 13/02. Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь и способ ее получения. Соломенцев А.Б., Колодезный В.П., Старчак А.П., Тюкалов И.В. – №2011120846/05; заявл.25.05.2011; опубл. 10.02.2013 г.
9. Сирота, А. Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов [Текст] / А. Г. Сирота. – Л.: Химия. – 1984. – 152 с.
10. Куликова, А.В. Реологические свойства дорожного битума с добавками для теплого асфальтобетона [Текст] / А.В. Куликова, А.Б. Соломенцев // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет-УНПК. – 2013. – №5. – С.73-78.
11. Королев, И.В. Дорожный теплый асфальтобетон [Текст] / И.В. Королев, Е.Н. Агеева, В.А. Головкин, Г.Ф. Фоменко. – Киев: Вища школа. Головное издательство. – 1984. – 200 с.
12. Колесник, Д.А. Выбор модификатора асфальтобетона для расширения строительного сезона [Текст] / Д.А. Колесник // Мир дорог. – 2013. – 71/октябрь. – С. 45-47.
13. Золотарев, В.А. Свойства асфальтобетонов на основе битумов с большим содержанием полимера [Текст] / В.А. Золотарев, А.С. Лапченко // Битумы, модифицированные полимерами и добавками. Избранные труды. Том 2 / В.А. Золотарев. – Санкт-Петербург: Славутич, 2013. – С. 103-110.

### **Соломенцев Александр Борисович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»  
Тел.: +7 (4862) 47-51-93  
E-mail: absolomentsev@mail.ru

### **Куликова Анастасия Владимировна**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительство автомобильных дорог»  
Тел.: +7 (953)-610-58-57  
E-mail: AnastKulikova@mail.ru

### **Бухтияров Сергей Владимирович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Студент пятого курса специальности 270205 «Автомобильные дороги и аэродромы»  
Тел.: +7 (920)-802-67-08  
E-mail: sersch009@mail.ru

---

A. SOLOMENTSEV, A. KULIKOVA, S. BUKCHTIYAROV

## **COMPARISON OF SOME PROPERTIES ROAD BITUMEN WITH DIFFERENT POLYMER ADDITIVES AND ASPHALT THE KNITTING BASED THEREON**

*Characterized by three groups of polymeric additives: synthetic waxes, thermoplastics and thermoplastic elastomers. Data on the use of polymer additives, defined the time of their distribution in*

*the road bitumen, bitumen adhesion additives with acidic rocks. Defined dynamic viscosity of bitumen with polymer additives at different temperatures. Defined physico-mechanical properties and sealability asphalt the knitting with different polymer additives. Found that supplementation with synthetic waxes improves compressibility asphalt the knitting at lower temperatures*

**Keywords:** road bitumen, asphalt, waxes, synthetic thermoplastics, thermoplastic elastomers, asphalt the knitting, warm asphalt mixes, compaction asphalt the knitting.

## BIBLIOGRAPHY

1. Jenciklopedija polimerov, T.1 [Tekst] – M.: «Sovetskaja jenciklopedija». – 1972. – 515 s.
2. Zolotarev, V.A. V kongress «Evroasfal't–Evrobotum» [Tekst] / V.A. Zolotarev // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli. – 2012. – №4. – S. 40-41.
3. Pokrovskij, A.V. Primenenie deflegmatorov [Tekst] / A.V. Pokrovskij, N.V. Majdanova // Avtomobil'nye dorogi. – 2011. – №5. – S. 120-122.
4. Kratkaja himicheskaja jenciklopedija, T.4 [Tekst] – M.: «Sovetskaja jenciklopedija». – 1965. – 199 s.
5. Jenciklopedija polimerov, T.2 [Tekst] – M.: «Sovetskaja jenciklopedija». – 1974. – 1032 s.
6. Modificirovannye bitumnye vjazhushhie, special'nye bitумы i bitумы s dobavkami v dorozhnom stroitel'stve PIARC-AIPCR / Perevod s franc. V.A. Zolotareva, P.A. Bespalovoj. – Har'kov.: Izd-vo HNADU. – 2003. – 229 s.
7. Jenciklopedija polimerov, T.3 [Tekst] – M.: Sovetskaja jenciklopedija. – 1977. – 638 s.
8. Patent №2474595 RF, MPK7 S08L 95/00, S04V, S04V 24/12, S08K 13/02. Shhebenochno-mastichnaja asfal'tobetonnaja smes' i sposob ee poluchenija. Solomencev A.B., Kolodeznyj V.P., Starchak A.P., Tjukalov I.V. – №2011120846/05; zajavl.25.05.2011; opubl. 10.02.2013 g.
9. Sirota, A. G. Modifikacija struktury i svojstv poliolefinov [Tekst] / A. G. Sirota. – L.: Himija. – 1984. – 152 s.
10. Kulikova, A.V. Reologicheskie svojstva dorozhnogo bituma s dobavkami dlja teplogo asfal'tobetona [Tekst] / A.V. Kulikova, A.B. Solomencev // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet-UNPK. – 2013. – №5. – S.73-78.
11. Korolev, I.V. Dorozhnyj teplyj asfal'tobeton [Tekst] / I.V. Korolev, E.N. Ageeva, V.A. Golovko, G.F. Fomenko. – Kiev: Vishha shkola. Golovnoe izdatel'stvo. – 1984. – 200 s.
12. Kolesnik, D.A. Vybor modifikatora asfal'tobetona dlja rasshirenija stroitel'nogo sezona [Tekst] / D.A. Kolesnik // Mir dorog. – 2013. – 71/oktjabr'. – S. 45-47.
13. Zolotarev, V.A. Svojstva asfal'tobetonov na osnove bitumov s bol'shim soderzhaniem polimera [Tekst] / V.A. Zolotarev, A.S. Lapchenko // Bitумы, modificirovannye polimerami i dobavkami. Izbrannye trudy. Tom 2 / V.A. Zolotarev. – Sankt-Peterburg: Slavutich, 2013. – S. 103-110.

### A. Solomentsev

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical science, senior lecture of the department «Building of highways»  
Ph.: +7 (4862) 47-51-93  
E-mail: absolomentsev@mail.ru

### A. Kulikova

State university – educational-science-production complex, Orel  
First year graduate student of department «Building of highways»  
Ph.: +7 953 610 58 57  
E-mail: AnastKulikova@mail.ru

### S. Bukhtiyarov

State university – educational-science-production complex, Orel  
Student of the 5-th class specialty 270205 «Highways and airfields»  
Ph.: +7 920 802 67 08  
E-mail: sersch009@mail.ru

**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»)  
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.  
+7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: str\_and\_rek@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 22.03.2014 г.  
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 4,94.  
Тираж 400 экз.  
Заказ № 225/14П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической  
базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.