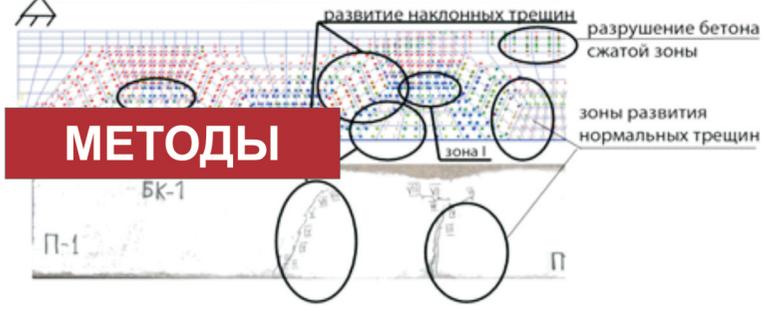


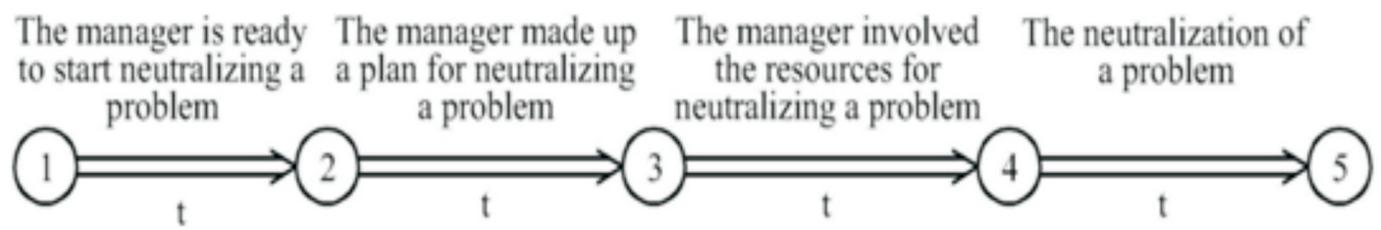
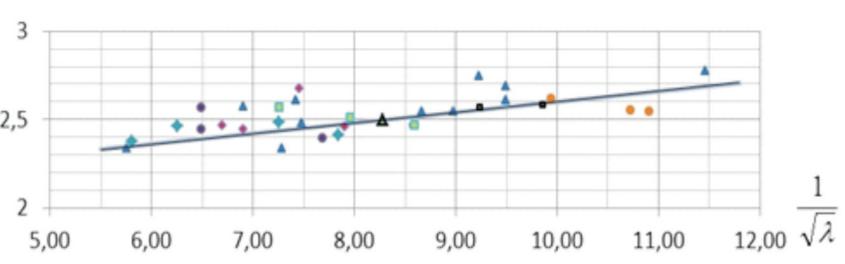
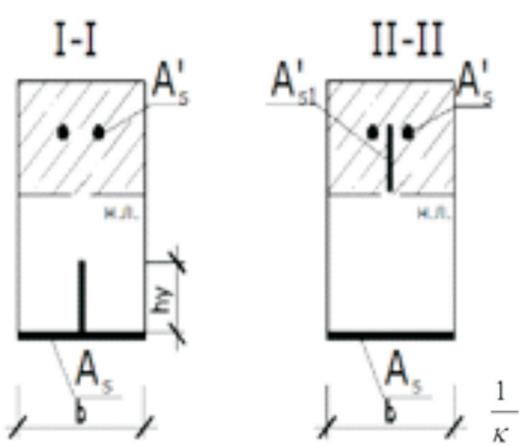
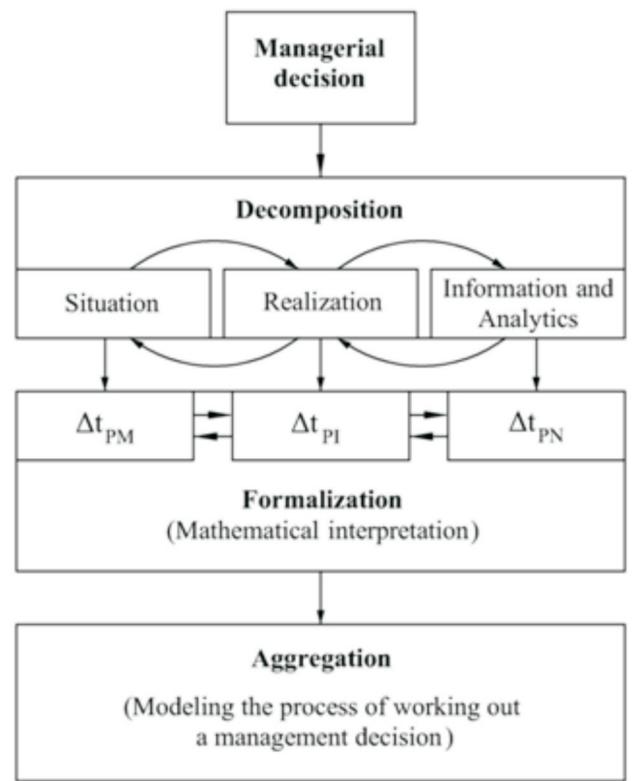
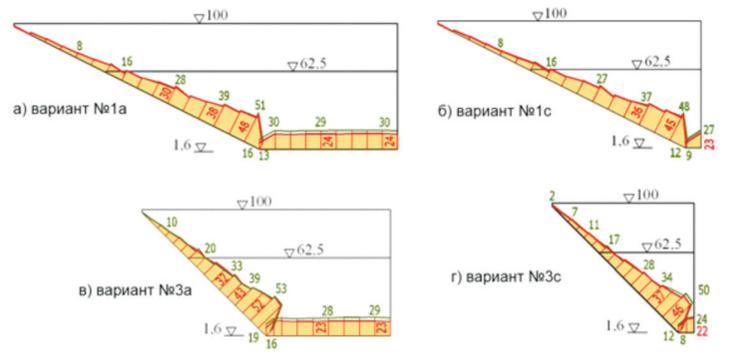
**КОНСТРУКЦИИ**



**МОДЕЛИ**



**МЕТОДЫ**





**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

**Инженерно-строительный институт**  
Центр дополнительных профессиональных программ  
195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,  
тел/факс: 552-94-60, [www.stroikursi.spbstu.ru](http://www.stroikursi.spbstu.ru),  
[stroikursi@mail.ru](mailto:stroikursi@mail.ru)

**Приглашает специалистов организаций, вступающих в СРО,  
на курсы повышения квалификации (72 часа)**

Код	Наименование программы	Виды работ*
<b>Курсы по строительству</b>		
<b>БС-01-04</b>	«Безопасность и качество выполнения общестроительных работ»	п.1,2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14
<b>БС-01</b>	«Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, устройства оснований и фундаментов»	1,2,3,5
<b>БС-02</b>	«Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций»	6,7
<b>БС-03</b>	«Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций»	9,10,11
<b>БС-04</b>	«Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования»	12,13,14
<b>БС-05</b>	«Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем»	15,16,17,18,19
<b>БС-06</b>	«Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи»	20,21
<b>БС-08</b>	«Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ»	23,24
<b>БС-12</b>	«Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов»	29
<b>БС-13</b>	«Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ»	30
<b>БС-14</b>	«Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб»	31
<b>БС-15</b>	«Осуществление строительного контроля»	32
<b>БС-16</b>	«Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика»	33
<b>Курсы по проектированию</b>		
<b>БП-01</b>	«Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения»	1,2,11
<b>БП-02</b>	«Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений»	3
<b>БП-03</b>	«Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения»	4
<b>БП-04</b>	«Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения»	5
<b>БП-05</b>	«Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений»	6
<b>БП-06</b>	«Разработка специальных разделов проектной документации»	7
<b>БП-07</b>	«Разработка проектов организации строительства»	8
<b>БП-08</b>	«Проектные решения по охране окружающей среды»	9
<b>БП-09</b>	«Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности»	10
<b>БП-10</b>	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	12
<b>БП-11</b>	«Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика»	13
<b>Э-01</b>	«Проведение энергетических обследований с целью повышения энергетической эффективности и энергосбережения»	
<b>Курсы по инженерным изысканиям</b>		
<b>И-01</b>	«Инженерно-геодезические изыскания в строительстве»	1
<b>И-02</b>	«Инженерно-геологические изыскания в строительстве»	2,5
<b>И-03</b>	«Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве»	3
<b>И-04</b>	«Инженерно-экологические изыскания в строительстве»	4
<b>И-05</b>	«Организация работ по инженерным изысканиям»	7

\*(согласно приказам Минрегионразвития РФ N 624 от 30 декабря 2009 г.)

**По окончании курса слушателю выдается удостоверение о краткосрочном повышении  
квалификации установленного образца (72 ак. часа)**

Для регистрации на курс необходимо выслать заявку на участие, и копию диплома об образовании по телефону/факсу: 8(812) 552-94-60, 535-79-92, , e-mail: [stroikursi@mail.ru](mailto:stroikursi@mail.ru).

[Http://www.engstroy.spbstu.ru](http://www.engstroy.spbstu.ru) – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет.  
Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском

**Инженерно-строительный журнал**

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

**Учредитель и издатель:**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**Адрес редакции:**

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 227А

**Главный редактор:**

Вера Михайловна Якубсон

**Научный редактор:**

Николай Иванович Ватин

**Выпускающий редактор:**

Екатерина Александровна Линник

**Редакционная коллегия:**

д.т.н., проф. В.В. Бабков;  
д.т.н., проф. М.И. Бальзанников;  
к.т.н., проф. А.И. Боровков;  
д.т.н., проф. Н.И. Ватин;  
PhD, professor M. Вельжкович;  
д.т.н., проф. А.Д. Гиргидов;  
д.т.н., проф. Э.К. Завадскас;  
д.ф.-м.н., проф. М.Н. Кирсанов;  
D.Sc., professor M. Кнежевич;  
д.т.н., проф. В.В. Лалин;  
д.т.н., проф. Б.Е. Мельников;  
д.т.н., проф. Ф. Неправишта;  
д.т.н., проф. Р.Б. Орлович;  
Dr. Sc. Ing., professor  
Л. Пакрастиньш;  
Dr.-Ing. Habil., professor  
Х. Пастернак;  
д.т.н., проф. А.В. Перельмутер;  
к.т.н. А.Н. Пономарев;  
д.ф.-м.н., проф. М.Х. Стрелец;  
д.т.н., проф. О.В. Тараканов.

**Содержание****КОНСТРУКЦИИ**

Медведев В.Н., Семенюк С.Д. Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием 3

**МОДЕЛИ**

Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины 16

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя 40

**МЕТОДЫ**

Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений (англ.) 53

Бурлов В.Г., Гробицкий А.М., Гробицкая А.М. Управление строительным производством с учетом показателя успешного выполнения производственного задания (англ.) 77

© ФГАОУ ВО СПбПУ, 2016

На обложке: иллюстрации авторов к статьям номера

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 05.10.16. Формат 60x84/8, усл. печ. л. 11,5. Заказ №2547.

Отпечатано в типографии СПбПУ. СПб, ул. Политехническая, д. 29

**Контакты:**

Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: [mce@ice.spbstu.ru](mailto:mce@ice.spbstu.ru)

Web: <http://www.engstroy.spbstu.ru>

[Http://www.engstroy.spbstu.ru](http://www.engstroy.spbstu.ru) – full-text open-access version in Internet. It is updated immediately with each new issue.

## Magazine of Civil Engineering

SCHOLAR JOURNAL

ISSN 2071-4726

Peer-reviewed scientific journal

Start date: 2008/09

8 issues per year

### Publisher:

Peter the Great St. Petersburg  
Polytechnic University

### Indexing:

Scopus, Russian Science Citation  
Index (WoS), Compendex, DOAJ,  
EBSCO, Google Academia, Index  
Copernicus, ProQuest, Ulrich's Serials  
Analysis System

### Corresponding address:

227a Hydro Building, 29  
Polytechnicheskaya st., Saint-  
Petersburg, 195251, Russia

### Editor-in-chief:

Vera M. Yakubson

### Science editor:

Nikolay I. Vatin

### Executive editor:

Ekaterina A. Linnik

### Editorial board:

V.V. Babkov, D.Sc., professor  
M.I. Balzannikov, D.Sc., professor  
A.I. Borovkov, PhD, professor  
M. Veljkovic, PhD, professor  
E.K. Zavadskas, D.Sc., professor  
M.N. Kirsanov, D.Sc., professor  
M. Knezevic, D.Sc., professor  
V.V. Lalin, D.Sc., professor  
B.E. Melnikov, D.Sc., professor  
F. Nepravishhta, D.Sc., assoc.  
professor  
R.B. Orlovich, D.Sc., professor  
L. Pakrastinsh, Dr.Sc.Ing., professor  
H. Pasternak, Dr.-Ing.habil.,  
professor  
A.V. Perelmuter, D.Sc., professor  
A.N. Ponomarev, PhD, professor  
M.Kh. Strelets, D.Sc., professor  
O.V. Tarakanov, D.Sc., professor

## Contents

### STRUCTURES

Medvedev V.N., Semeniuk S.D. Durability and  
deformability of braced bending elements with external  
sheet reinforcement (rus) 3

### MODELS

Sainov M.P. Impact of dam site configuration on 3D  
stress-strain state of concrete faced rockfill dam (rus) 16  
Rylova I.A. Detailed characteristics of the near-wall flow  
containing unsteady viscous sublayer in smooth  
channel (rus) 40

### METHODS

Garifullin M.R., Barabash A.V., Naumova E.A., Zhuvak  
O.V., Jokinen T., Heinisuo M. Surrogate modeling for  
initial rotational stiffness of welded tubular joints 53  
Burlov V.G., Grobitski A.M., Grobitskaya A.M.  
Construction management in terms of indicator of the  
successfully fulfilled production task 77

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. All rights reserved.

On the cover: authors' illustrations

+7(812) 535-52-47

E-mail: [mce@ice.spbstu.ru](mailto:mce@ice.spbstu.ru)

Web: [Http://www.engstroy.spbstu.ru/eng/index.html](http://www.engstroy.spbstu.ru/eng/index.html)

doi: 10.5862/MCE.63.1

## Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием

### Durability and deformability of braced bending elements with external sheet reinforcement

**Ассистент В.Н. Медведев**  
**д-р техн. наук, профессор С.Д. Семенюк,**  
Белорусско-Российский университет, г.  
Могилев, Республика Беларусь

**V.N. Medvedev**  
**S.D. Semeniuk,**  
Belarusian- Russian University, Mogilev, Belarus

**Ключевые слова:** сопротивление;  
сталебетонный изгибаемый элемент; внешнее  
листовое армирование; собственные  
деформации

**Key words:** resistance; reinforced concrete  
bending element; external sheet reinforcement;  
proper deformation

**Аннотация.** Экономическая эффективность сталебетонной конструкции КНЭСК (композитный несущий элемент строительных конструкций) достигается за счет многоцелевого использования упрочняющего элемента, который обеспечивает надежное сцепление стального опорного листа с бетоном, воспринимает поперечное усилие по прочности наклонных сечений, обеспечивает жесткость на стадии подачи бетонной смеси, воспринимает растягивающие и сжимающие усилия по прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента. Уточнены методики расчета прочности сечений, нормальных (упругопластическая модель) и наклонных (деформационная модель) к продольной оси элемента, за счет учета работы упрочняющего элемента. Предложены зависимости по определению изгибной жесткости с различным положением волны упрочняющего элемента. Обоснованы геометрические размеры элементов сварного каркаса сталебетонного изгибаемого элемента типа КНЭСК. Предложены регрессионные зависимости по их определению для разных схем закрепления. Разработана методика проведения экспериментальных исследований балочных изгибаемых элементов типа КНЭСК. Получены данные о несущей способности, характере предельного состояния, напряженно-деформируемом состоянии исследуемых образцов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании подобного рода конструкций.

**Abstract.** Economic efficiency of the CBEBS (composite bearing element of building structures) construction is achieved through the multipurpose usage of a strengthening element, which provides reliable adhesion between a steel supporting sheet and concrete, sustains a lateral load along durability of oblique sections, provides inflexibility during concrete mix feeding, sustains stretching and compressing forces along the durability sections to longitudinal axes of the element. At the expense of the strengthening element performance, the authors specified calculation methods for durability of normal (elastoplastic model) and oblique sections to longitudinal axes of the element (deformative model). There were offered dependencies to define bending rigidity with a different location of the wave of the strengthening element. There were validated geometrical sizes of the welded framework of the CBEBS reinforced concrete bending element. Besides, the authors came up with regression dependencies to define geometrical sizes for different fastening schemes. The paper presents a developed method to carry out experimental research on the CBEBS braced bending element. We have obtained data about bearing capacity, nature of the limiting state, the stress – strain state of the examined samples. The data that have been obtained can be used to design similar constructions.

### Введение

Вопрос использования стального листа в комплексе с железобетонным элементом в строительной практике возник тогда, когда появилась необходимость создать конструкции для зданий и сооружений, которые бы играли роль гидроизоляции. В то время толщина стального листа как элемента изоляции принималась конструктивно и не учитывалась при расчете несущей способности конструкций.

Сталебетонные конструкции применяются в специальном, промышленном и гражданском строительстве [1–12], в мостостроении, в машиностроении [13] и других областях строительства. Наиболее распространенными и хорошо исследованными конструкциями с внешним армированием являются трубобетонные [12, 14, 15], в которых, благодаря преобразованию одноосного напряженного состояния в трехосное, обеспечивается повышение прочности бетонного ядра и несущей конструкции в целом.

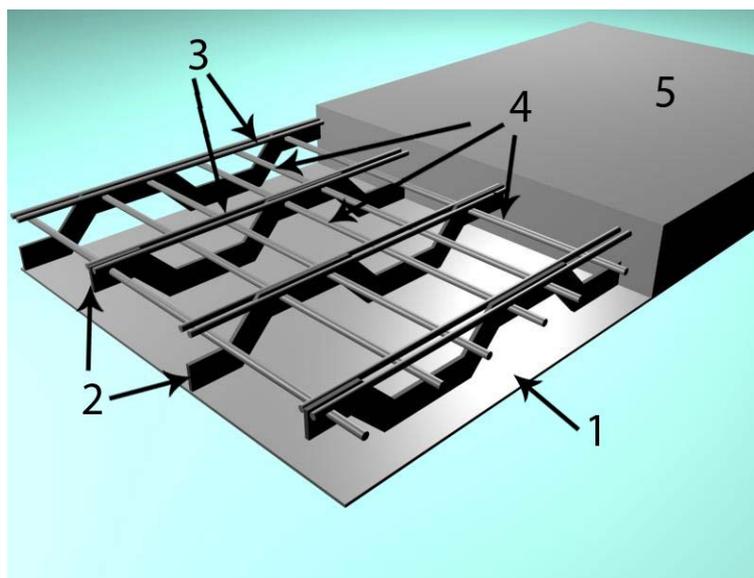
Конструкции с листовой арматурой [16–19] незаменимы при необходимости металлической гидроизоляции в сооружениях объектов транспортного строительства, атомной энергетики. С их использованием строятся различные подземные сооружения: фундаменты под оборудование, тоннели, резервуары, опускные колодцы, подводные и плавучие сооружения, перекрытия с профилированной листовой и ортотропной арматурой, сооружения АЭС. Большой интерес вызывают сталебетонные конструкции с внешним полосовым армированием, применяемые в виде ригелей, подкрановых балок [20]. При этом используются конструкции с одиночным и двойным армированием полосами, в том числе предварительно напряженные [20].

### Обзор литературы

В настоящее время имеется значительное количество работ, посвященных экспериментальным и теоретическим исследованиям прочности сталебетонных конструкций [1–10].

В 40-х и 50-х годах сталебетонные конструкции рассчитывались в предположении упругой работы стали и бетона, основанной на гипотезе плоских сечений и пропорциональности напряжений деформациям. Следующим этапом развития методов расчета сталежелезобетонных изгибаемых конструкций был метод предельного равновесия, предполагающий достижение всем сечением стального и железобетонного элементов сталежелезобетонной конструкции расчетных сопротивлений стали и бетона, а также основанный на гипотезе плоских сечений. Данный метод нашел свое широкое применение при расчете рассматриваемых конструкций и рассмотрен в работах авторов А.П. Васильева, А.А. Гвоздева [21–22].

К первым экспериментальным исследованиям сталебетонных конструкций можно отнести исследования Маккея, в которых исследовались стальные балки, помещенные в бетон, а также работы Кауфи, по результатам которых были предложены расчетные методики. Из современных работ можно отметить работы по изучению сталежелезобетонных балок, проводимые в Иллинойском университете, Сибирском автодорожном институте. Кроме того, необходимо отметить экспериментальные работы по изучению пространственных сталежелезобетонных балок, проведенные в ЦНИИАСе [23] и МАДИ Н.Н. Стрелетским и Г.Н. Соловьевым [24, 25].



**Рисунок 1. Общий вид сталебетонной конструкции с использованием упрочняющего элемента: 1 – стальной опорный лист; 2 – фасонная арматура (упрочняющий элемент); 3 – продольная стержневая арматура; 4 – поперечная стержневая арматура; 5 – бетон**

Исследуемая конструкция (рис. 1), представляет собой сталебетонную балочную плиту, объединяющую стальной опорный лист, бетонный слой, упрочняющий элемент, установленный в продольном направлении, продольную и поперечную стержневую арматуру. Сущность этой конструкции состоит в том, что совместная работа бетона с опорным листом осуществляется за счет упрочняющего элемента (рис. 1, поз. 2), который выполнен из стального листа и приваривается к нижнему опорному листу (рис. 1, поз. 1). Кроме осуществления сцепления стального листа с бетоном, упрочняющий элемент улучшает работу конструкции, повышая несущую способность по прочности нормальных и наклонных сечений. При смещении волн упрочняющего элемента друг относительно друга на расстояние, равное половине длины волны, стальной сварной каркас повышает жесткость как на стадии подачи бетона омоноличивания (рис. 1, поз. 5), так и после набора прочности бетона.

Основные преимущества предлагаемой конструкции:

- снижение трудоемкости и стоимости изготовления за счет использования стального листа в качестве опалубки;
- повышенное сцепление металлической и бетонной составляющих;
- высокая несущая способность конструкций;
- повышение срока эксплуатации (в 1.5 раза).

Областью применения рассматриваемых конструкций является:

- мостостроение (возведение пролетных строений мостов);
- реконструкция (при замене плит междуэтажного перекрытия и покрытия);
- новое строительство (возведение балок железобетонного каркаса и плит перекрытия);
- строительство объектов, имеющих повышенные требования к несущей способности, экологичности, герметичности и сейсмостойкости (строительство АЭС, ГЭС и т.д.).

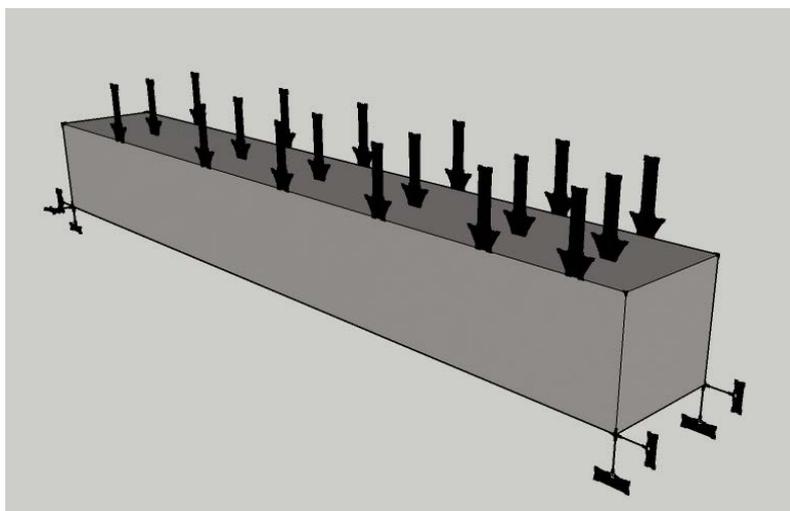
Для оценки напряженно-деформированного состояния предлагаемой конструкции были проведены численные исследования с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS [26–28].

Численные исследования проводились с использованием теории планирования эксперимента (рис. 2). На основе результатов исследований были построены регрессионные зависимости, описывающие влияние факторов варьирования на функцию отклика.

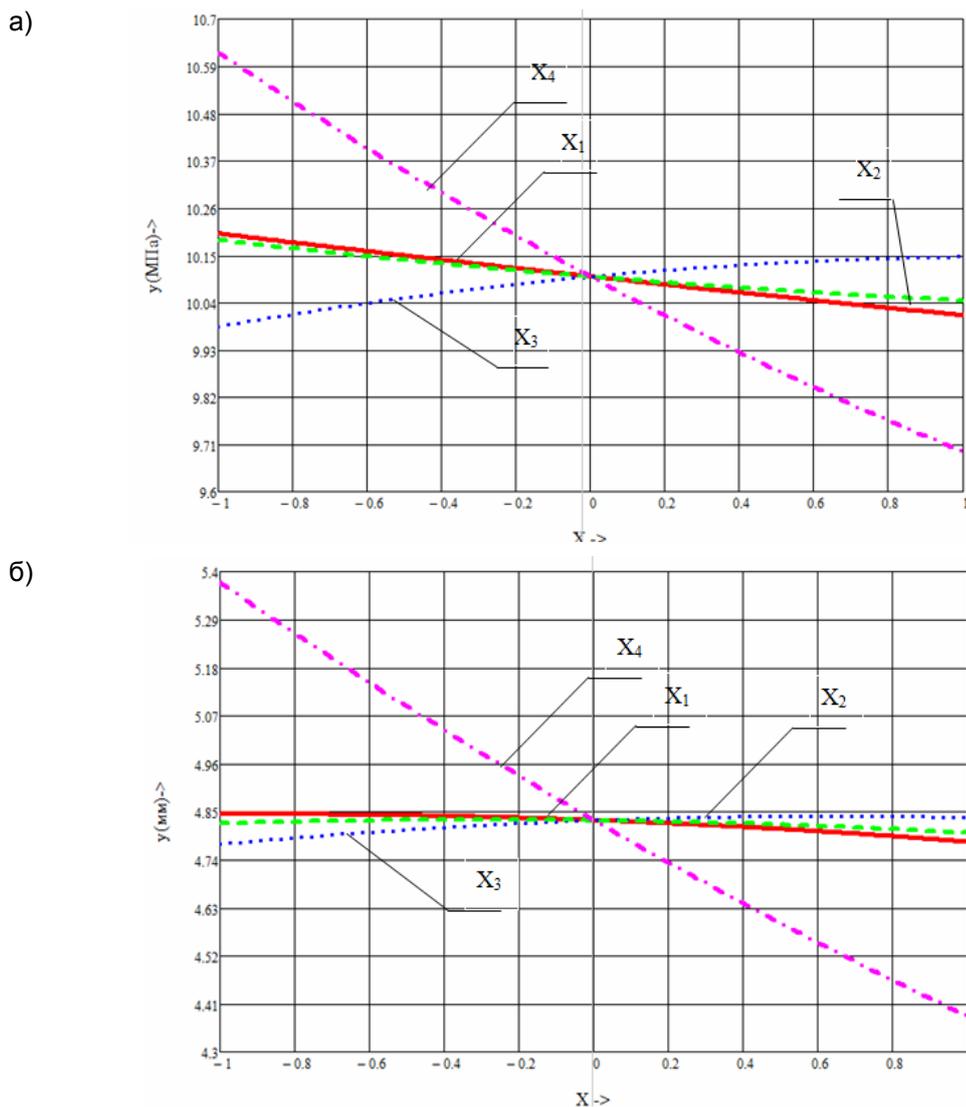
В качестве плана вычислительного эксперимента был принят дробнофакторный план второго порядка [29] в нормированных значениях. Полиномиальная модель, описывающая зависимость функции отклика от значений факторов варьирования, имеет следующий вид:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1^2 + a_2 \cdot X_2^2 + a_3 \cdot X_3^2 + a_4 \cdot X_4^2 + a_5 \cdot X_1 + a_6 \cdot X_2 + a_7 \cdot X_3 + a_8 \cdot X_4 \quad (1)$$

где  $a_i$  – подлежащие определению коэффициенты.



**Рисунок 2. Расчетная схема композитного несущего элемента с внешним листовым армированием при изгибе с двусторонним шарнирным опиранием**



**Рисунок 3. Значения функции отклика от факторов варьирования при шарнирном опирании и равномерно распределенной нагрузке: а) для вертикального прогиба  $Y_1$ (мм); б) для эквивалентных напряжений  $Y_1$ (МПа)**

В качестве факторов варьирования были приняты следующие:

- $X_1$  – толщина листа упрочняющего элемента, мм;
- $X_2$  – шаг волн вдоль оси элемента, мм;
- $X_3$  – высота поперечного сечения упрочняющего элемента, мм;
- $X_4$  – толщина опорного листа, мм.

В качестве функций отклика были приняты прочностно-жесткостные и массовые характеристики КНЭСК (Композитный несущий элемент строительных конструкций):  $Y_1$  – максимальный вертикальный прогиб (мм);  $Y_2$  – максимальные эквивалентные напряжения в арматуре (МПа);  $Y_3$  – масса металлической составляющей (кг).

Проверку значимости коэффициентов в полученных уравнениях регрессии осуществляли с помощью критического значения распределения Стьюдента [30]. Проверку адекватности полученных уравнений регрессии проводили по критерию Фишера.

Из полученных данных удалось установить (рис. 3), что на уровень напряжений и максимальные прогибы в стальном каркасе наибольшее влияние оказал фактор  $X_4$ , однако этот же фактор оказывает наибольшее влияние и на массу исследуемой конструкции. Для схемы закрепления с жестким опиранием конструкции, кроме отмеченного фактора  $X_4$ , на уровень напряжений оказывает влияние также высота упрочняющего элемента ( $X_3$ ). Об остальных

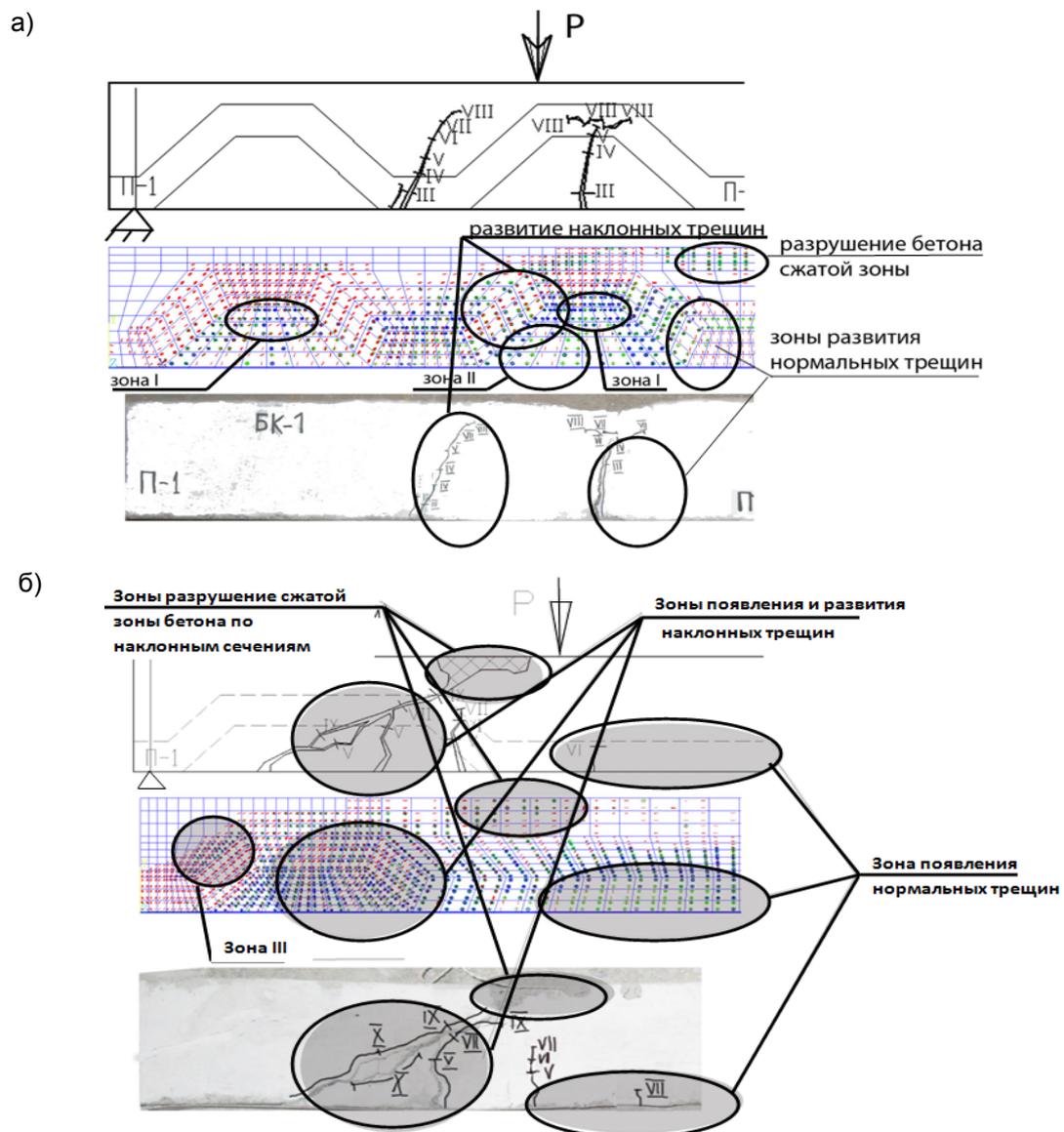
Medvedev V.N., Semenuk S.D. Prochost i deformativnost balochnyh izgibaemyh elementov s vneshnim listovym armirovaniem [Durability and deformability of braced bending elements with external sheet reinforcement]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 3–15. (rus) doi: 10.5862/MCE.63.1.

факторах варьирования можно говорить, что степень их влияния на функции отклика невелика. Однако при проектировании исследуемой конструкции необходимо определить, какая из качественных характеристик (жесткость или масса) является более важной.

Найдено предельное значение шага волн упрочняющего элемента вдоль оси элемента, при значениях ниже которого уровень напряжений не изменяется, а при большем начинает увеличиваться. Так, для жесткой схемы закрепления шаг  $X_3$  равен 0.357 м.

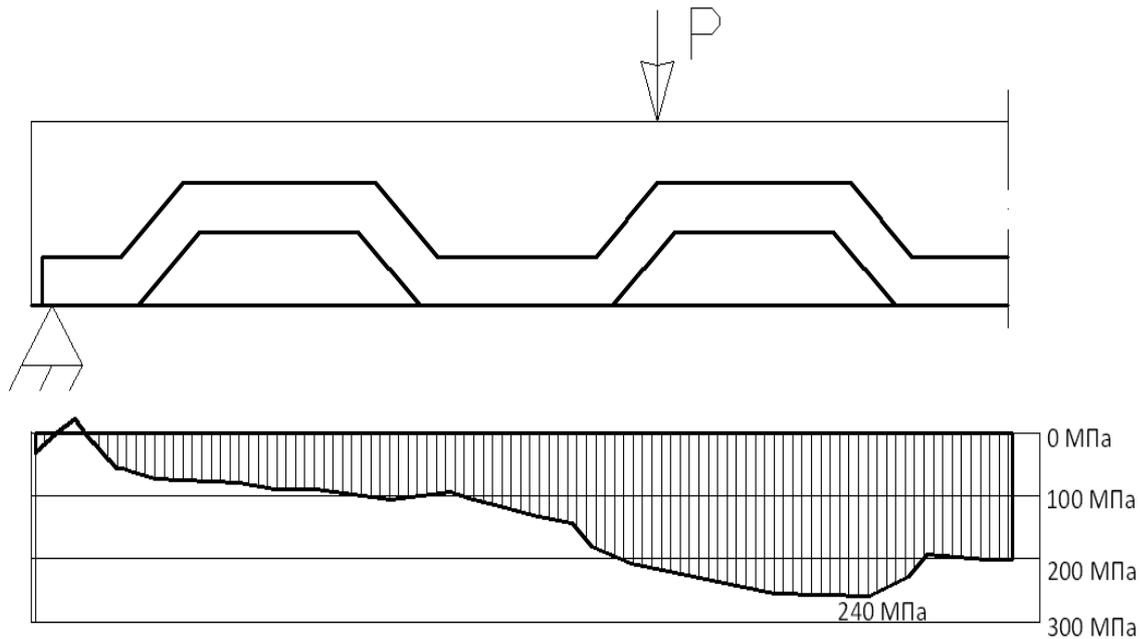
На основе результатов исследований были получены регрессионные зависимости, позволившие обоснованно и в соответствии с предъявляемыми к конструкции требованиями производить выбор конструктивных параметров металлической составляющей.

Численными исследованиями для балок серий БК-1 и БК-3, кроме зон появления нормальных и наклонных трещин, были определены зоны внутреннего, местного разрушения бетона вследствие перераспределения усилий от упрочняющего элемента (зона I, рис. 4), а также в результате нарушения сцепления бетона с упрочняющим элементом. Характер предельного состояния конечноэлементной модели показал, что для предотвращения деструктивных процессов в зоне контакта упрочняющего элемента с бетоном, а также для более надежной анкерки необходимо устанавливать дополнительные анкерующие элементы (поперечные стержни).



**Рисунок 4. Разрушение балок при численном моделировании и сравнение с экспериментальными данными: а) балка БК-1; б) балка БК-2**

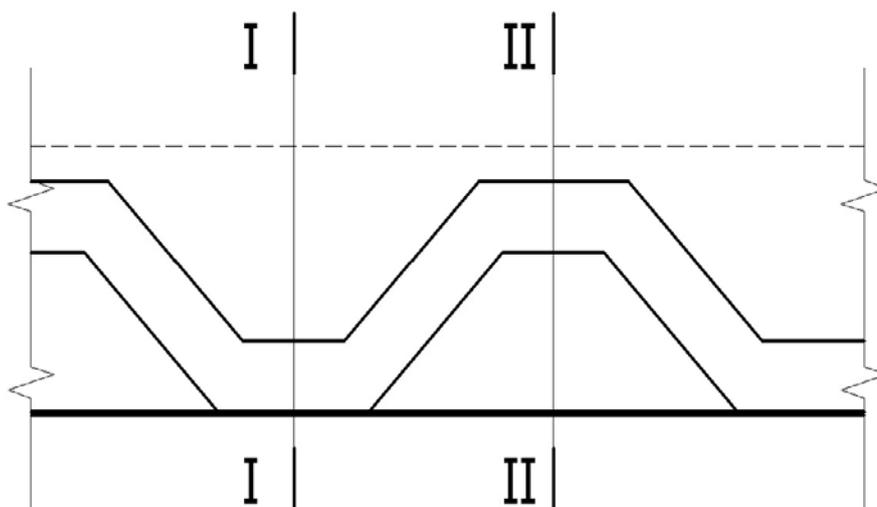
Медведев В.Н., Семенюк С.Д. Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 3–15.



**Рисунок 5. Эпюра эквивалентных напряжений в стальном опорном листе для балки БК-1, БК-1а**

Выявлено снижение напряжений и деформаций в зонах сварных соединений (рис. 5) стального опорного листа с упрочняющим элементом. Это связано с увеличением поперечного сечения, а также с повышением жесткости стального опорного листа за счет включения в работу упрочняющих элементов.

Таким образом, эпюра эквивалентных напряжений стального листа имеет волнообразную форму с минимумами в местах сварных соединений и максимумами в пролетах между ними. В связи с этим при проектировании данного вида конструкций целесообразно увеличивать длину контакта между опорным листом и упрочняющим элементом в зонах максимального изгибающего момента.



**Рисунок 6. Характерные сечения в зоне чистого изгиба**

При проектировании изгибаемых сталебетонных балочных элементов с упрочняющим элементом рекомендуется устанавливать упрочняющий элемент таким образом, чтобы он

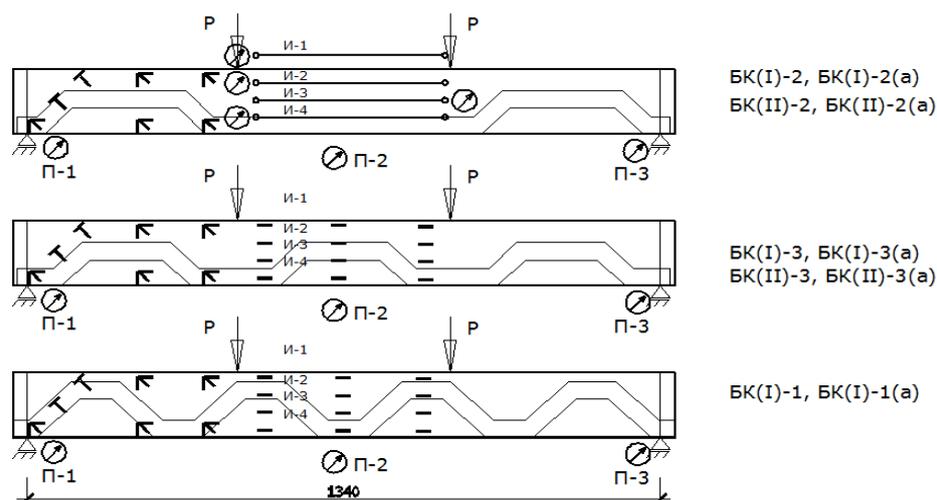
находился максимально близко к внешней растянутой грани сечения (рис. 6, сечение I–I). Это позволит воспринимать дополнительный изгибающий момент. При этом характеристики сварного шва (длина, катет и пр.) принимаются по расчету.

По результатам численных исследований были подготовлены и проведены натурные испытания балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием. В ходе испытаний было изготовлено и испытано три серии образцов, включающих в себя 18 балок. Тестовая серия состояла из 8 балок с использованием традиционных анкерных упоров из стержневой арматуры. Вторая и третья серия включали в себя 10 опытных балок с использованием упрочняющего элемента (рис. 7).

Геометрические размеры опытных образцов выбирались по результатам численных исследований, описанных выше. Это позволило при минимальном количестве опытов получить наиболее полную картину о прочности, деформативности и характере предельного состояния исследуемых конструкций. Опалубочные размеры опытных элементов составляли 1,4x0,15x0,1 м.

Испытания железобетонных балок производились по схеме четырехточечного изгиба на прессе «ГМС-50». Схемы расположения измерительных приборов и приложения нагрузок приведены на рисунке 7.

Как показали экспериментальные исследования, характер образования и развития нормальных трещин в зоне чистого изгиба экспериментальных образцов зависит от положения упрочняющего элемента. Образование трещин и значительное их раскрытие главным образом происходило в сечении с положением волны упрочняющего элемента вверху. Удалось получить среднее значение расстояния между трещинами  $l_{cr}$ . Для балок серии БК-3 и БК-3а максимальное и минимальное значения  $l_{cr}$  составили 276 и 135 мм, средневзвешенное значение составило 180.4 мм. Для балок серии БК-1 и БК-1а максимальное и минимальное значения  $l_{cr}$  составили 269 и 133 мм, средневзвешенное значение составило 170.5 мм.



**Рисунок 7. Схема расположения тензорезисторов и других измерительных приборов на бетоне опытных образцов**

Экспериментально полученные графики «момент – кривизна» для сечений с положением волны упрочняющего элемента внизу (рис. 8) показывают, что жесткость рассматриваемого сечения остается неизменной вплоть до разрушения образца ( $B=const$ ).

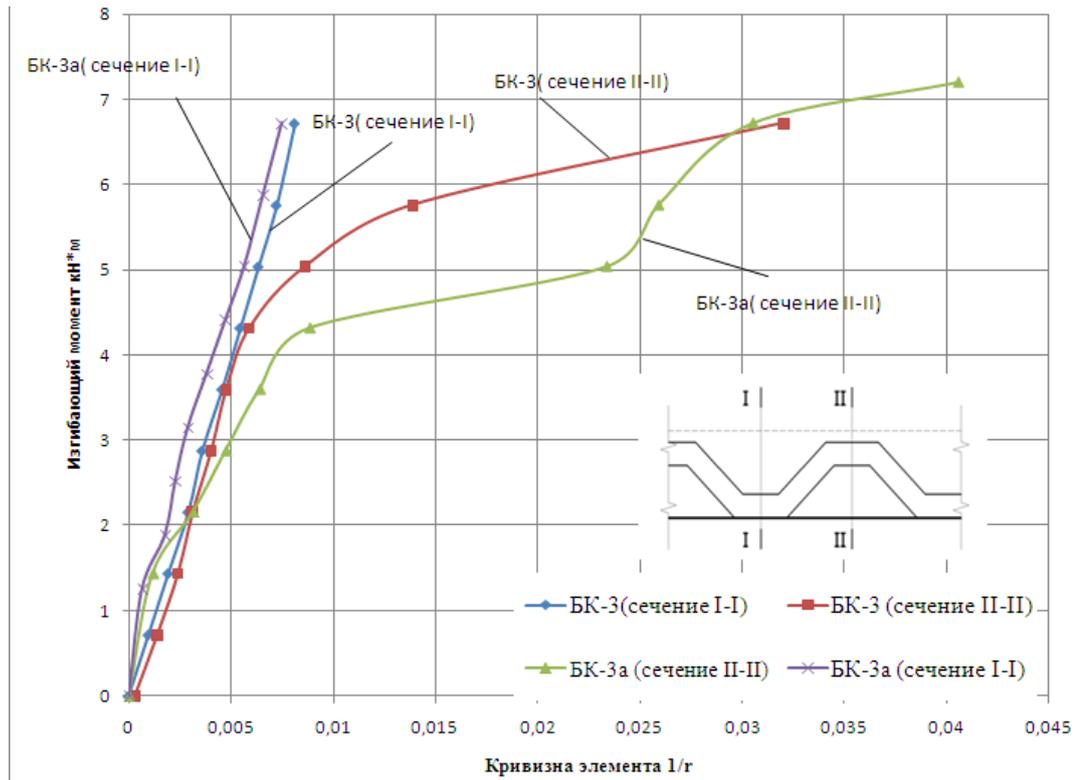
На основании полученных данных об особенностях работы бетона и стали в нормальном сечении элемента сделан вывод о перераспределении внутренних усилий в бетоне, а также о неравномерном перераспределении деформаций вдоль оси элемента. Этот факт может быть объяснен волнообразной формой упрочняющего элемента.

Несущая способность экспериментальных сталебетонных балок с использованием упрочняющего элемента оказалась на 30 % больше, чем несущая способность тестовых образцов с традиционными анкерными упорами, выполненными из стержневой арматуры.

Характерным для экспериментальных образцов серии БК-2 является разрушение всех 4 балок по наклонным сечениям, причем наклонная трещина пересекала упрочняющий элемент под углом  $60^\circ \dots 90^\circ$ . Угол наклона трещины менялся по мере ее развития.

Медведев В.Н., Семенук С.Д. Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 3–15.

a)



б)

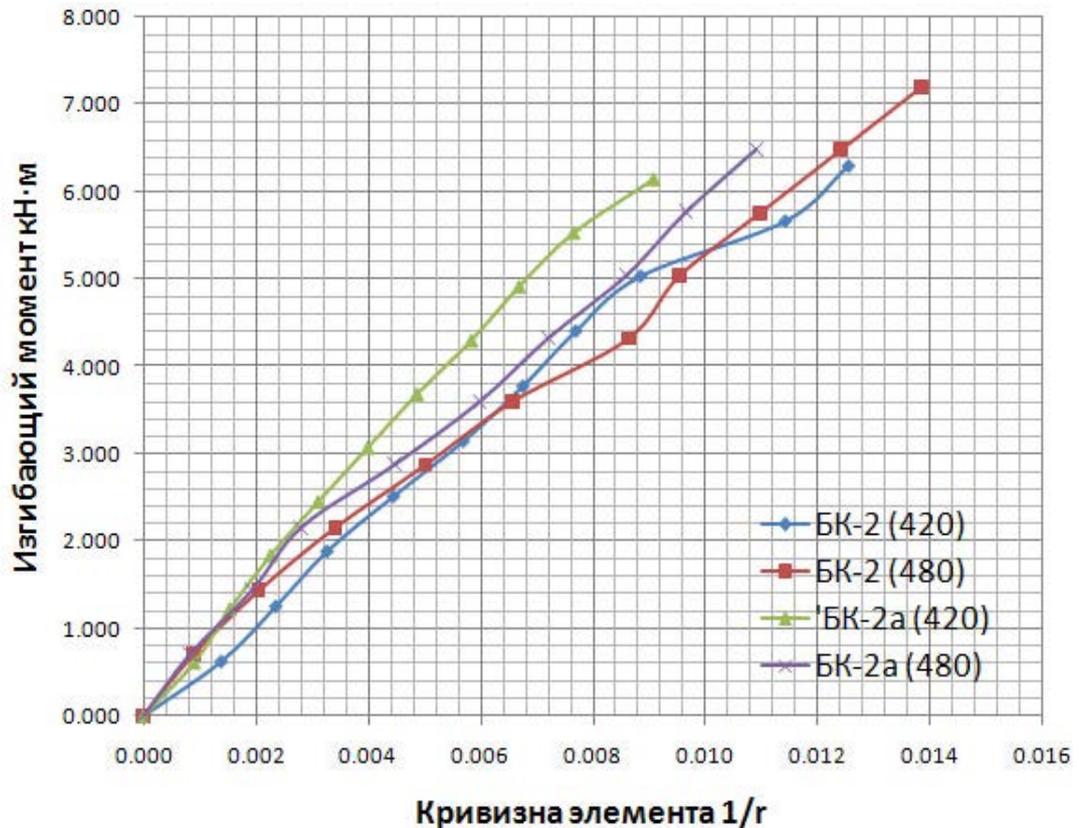


Рисунок 8. Зависимость «момент – кривизна»: а) для балок БК-3; б) для балок БК-2

На основе экспериментальных данных и данных численных исследований предлагаются уточненные методики для расчета прочности сечений, нормальных (упругопластическая модель [31]) и наклонных (деформационная модель [32]) к продольной оси элемента.

Предложены зависимости по определению изгибной жесткости с различным положением волны упрочняющего элемента. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием на основании данных численных исследований и их сравнение с экспериментальными данными.

При расчете прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, по упругопластической модели (2) в расчет вводятся прочностные и деформативные характеристики бетона и стали, зависящие от предельной сжимаемости и деформативности ( $\lambda$  – коэффициент пластичности).

$$M_{sd} \leq M_{rd} = 0,5 \cdot b \cdot x [(1 + \lambda)d - 0,33x(1 + \lambda + \lambda^2)] + f_{cu} \cdot A'_s(d - c'), \quad (2)$$

где (см. рис. 9)  $M_{sd}$  – расчетный изгибающий момент, вызванный действием внешней нагрузки;  $M_{rd}$  – прочность сечения при изгибе;  $b$  – ширина расчетного сечения;  $\lambda$  – коэффициент пластичности;  $d$  – рабочая высота элемента;  $c'$  – защитный слой бетона для сжатой арматуры;  $A'_s$  – площадь сжатой арматуры;  $f_{su}$  – нормальные напряжения в сжатой арматуре.

При расчете конструкций с внешним листовым армированием предлагается вводить в расчет уточненную рабочую высоту элемента  $d$ , мм (3):

$$d = h - y'_c, \quad (3)$$

где  $h$ , мм – высота сечения элемента;  $y'_c$ , мм – положение центра тяжести составного сечения стального каркаса (рис. 9), равное:

$$y'_c = \frac{\sum S_{0-0}}{\sum A}, \quad (4)$$

где  $\sum S_{0-0}$  – сумма статических моментов относительно оси 0–0;  $\sum A$  – сумма площадей поперечного сечения стальной сварной составляющей.

Расчет сталебетонных элементов с упрочняющим элементом на действие поперечной силы для обеспечения прочности по наклонной трещине автором предлагается определять по деформационной модели с учетом  $A_{sy}$  (5):

$$V_{Rd} = f_{yd2} \cdot A_{sy} + \frac{1,5 \cdot \eta_{c2} \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d^2}{l_{inc}}, \quad (5)$$

где  $V_{rd}$  – расчетная поперечная сила, воспринимаемая элементом;  $f_{yd2}$  – расчетное сопротивление стали упрочняющего элемента при разрыве;  $f_{ctd}$  – расчетное сопротивление бетона растяжению;  $b_w$  – расчетная ширина балки при расчетах на действие перерезывающих сил;  $l_{inc}$  – проекция наклонной трещины на продольную ось элемента;  $\eta_{c2}$  – коэффициент, учитывающий влияние вида бетона, принимается для бетона: тяжелого – 2.0, мелкозернистого – 1.7, легкого при марке по средней плотности D1900 и более – 1.9;  $A_{sy}$  – вводимая в расчет проекция поперечного сечения упрочняющего элемента на ось наклонной трещины (рис. 10):

$$A_{sy} = A_n / \sin(\alpha + \theta) \quad (6)$$

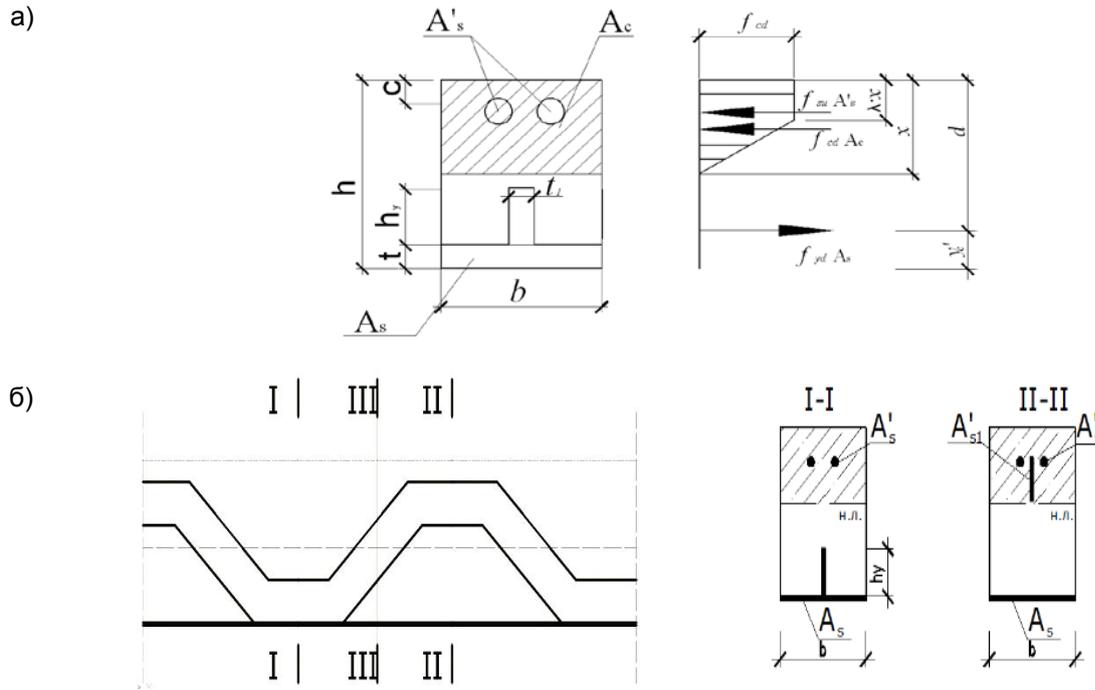


Рисунок 9. К расчету прочности нормальных сечений: а) усилия в сечении, нормальном к продольной оси элемента, для сечения I-I; б) расчетные сечения балочного изгибаемого элемента

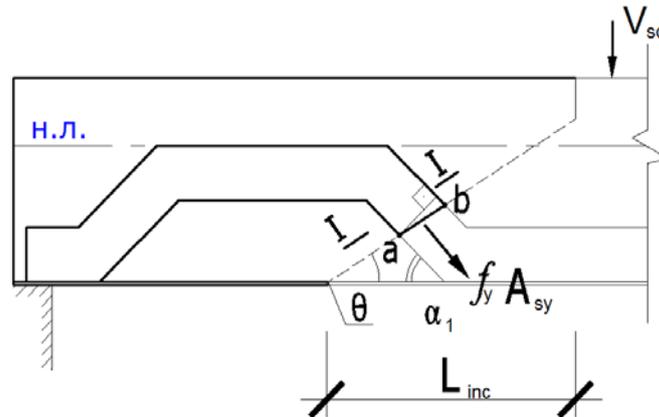


Рисунок 10. К определению рабочей площади упрочняющего элемента в наклонном сечении

Величина прогиба исследуемой конструкции определяется согласно формуле:

$$a = \int_0^l M(x) \frac{M_{sd}(x)}{B_{st}} dx, \tag{7}$$

где  $M(x)$  – уравнение изгибающих моментов в балке от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения в сечении  $x$ ;

$M_{sd}(x)$  – уравнение изгибающих моментов в сечении  $x$ ;

$B_{st}$  – изгибная жесткость исследуемого элемента нагрузки,  $H \cdot m^2$ , определяемая по (8):

$$B_{st} = B_s + B_c, \tag{8}$$

где  $B_s$  – жесткость, обеспечиваемая стальным каркасом,  $H \cdot m^2$ ;

$B_c$  – жесткость, обеспечиваемая бетоном,  $H \cdot m^2$ .

При этом  $B_s$  предлагается определять по формулам: (9) – для сечения I-I; (10) – для сечения II-II (рис. 9).

$$B_s^{I-I} = E_s I_s^{I-I} = E_s \left[ (t \cdot b + t_1 \cdot h_y) \cdot \left( h - (x + y'_c) \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$B_s^{II-II} = E_s I_s = E_s \left[ \left( t \cdot b \cdot \left( h - \left( x + \frac{t}{2} \right) \right)^2 + t_1 \cdot h_y \cdot \left( x - \left( h - h_t - \frac{h_y}{2} \right) \right)^2 \right). \quad (10)$$

где  $E_s$  – модуль упругости стали;  $t$ ,  $t_1$ ,  $h_y$ ,  $h_b$ ,  $h$ ,  $b$ ,  $x$  – геометрические характеристики поперечного сечения стальной сварной составляющей, указанные на рисунке 9.

В результате анализа напряженно-деформируемого состояния конечноэлементной модели исследуемой конструкции удалось установить ряд особенностей, обусловленных характером геометрии упрочняющего элемента, а также расположением его в объеме образцов.

### Заключение

В результате проделанной работы были достигнуты следующие результаты.

1. Впервые проведены численные исследования напряженно-деформируемого состояния балочных конструкций, использующих упрочняющий элемент в качестве анкера. Основными результатами проведенных исследований являются:

- научно обоснованные конструктивные параметры стального каркаса как на стадии восприятия нагрузки от веса свежесушеного бетона, так и после набора прочности бетоном, включающие количество и размещение в плане упрочняющих элементов;
- регрессионные зависимости (получены впервые) для различных схем закрепления конструкции, позволяющие обоснованно и в соответствии с предъявляемыми к конструкции требованиями производить выбор оптимальных конструктивных параметров металлической составляющей;
- данные об особенностях напряженно-деформируемого состояния балочных изгибаемых элементов в зоне контакта упрочняющего элемента с бетоном.

2. Впервые получены результаты экспериментальных исследований сопротивления балочных сталебетонных элементов с различными геометрическими размерами упрочняющего элемента, касающиеся:

- характера напряженно-деформированного состояния опытных образцов на различных этапах нагружения, включая картины трещинообразования и разрушения;
- экспериментального определения жесткостных характеристик балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием при различном положении волны упрочняющего элемента.

3. На основе экспериментальных данных и данных численных исследований разработана модель сопротивления балочных изгибаемых элементов с использованием диаграмм деформирования для материалов, условия совместности деформаций и равновесия для критических сечений (прочность нормальных и наклонных сечений, прочность контакта стального листа с бетоном). Предложены зависимости по определению изгибной жесткости с различным положением волны упрочняющего элемента.

### Литература

1. Замалиев Ф.С. Прочность и деформативность сталежелезобетонных изгибаемых конструкций гражданских зданий при различных видах нагружения: дис. ... д-ра тех. наук. Казань. 2013. 349 с.
2. Hsiao P.C., Lehman D. E., Roeder C. W. Improved Analytical Model for Special Concentrically Braced Frames // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. No. 73. Pp. 80–94.
3. Пекин Д.А. Плитная сталежелезобетонная конструкция. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2010. 440 с.
4. Ye J.H., Chen W. Elastic restrained distortional buckling of steel-concrete composite beams based on elastically supported column method. // *International Journal of*

### References

1. Zamaliyev F.S. *Prochnost i deformativnos: stalezhelezobetonnykh izgibayemykh konstruktsiy grazhdanskikh zdaniy pri razlichnykh vidakh nagruzheniya* [The strength and deformability of composite bent constructions of civil buildings with different types of loading]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Kazan, 2013. 349 p. (rus)
2. Hsiao P.C., Lehman D.E., Roeder C.W. Improved Analytical Model for Special Concentrically Braced Frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. No. 73. Pp. 80–94.
3. Pekin D.A. *Plitnaya stalezhelezobetonnyaya konstruktsiya* [The reinforced concrete slab construction] M.: Izdatelstvo Assotsiatsii stroitelnykh vuzov, 2010. 440 p. (rus)
4. Ye J.H., Chen W. Elastic restrained distortional buckling

Медведев В.Н., Семенов С.Д. Прочность и деформативность балочных изгибаемых элементов с внешним листовым армированием // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 3(63). С. 3–15.

- Structural Stability and Dynamics. 2013. No. 13(1). Pp. 1-29.
5. Фридкин В.М. Принципы формообразования в теории линейно протяженных сооружений: дис. ... д-ра тех. наук. М., 2006. 512 с.
  6. Стрелецкий Н. С. Сталежелезобетонные конструкции в нашей стране. Металлические конструкции: спец. курс. М.: Москва. 1995. С. 126—132.
  7. Стороженко Л.И., Ефименко В.И., Пенц В.Ф. Строительные конструкции из стальных труб, заполненных центрифугированным бетоном. Киев: Четверта хвиля. 2001. 144 с.
  8. Lawson R. M. Recent Trends in Composite Construction. // Concrete. 1986. No. 20(2). Pp. 5—7.
  9. Champenois D., Corfdir A., Corfdir P. Calculating the critical buckling force in compressed bottom flanges of steel-concrete composite bridges. // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2014. Vol. 18(3). Pp. 271—292.
  10. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs // Engineering Structures. 2016. No. 114(1). Pp 171-180.
  11. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression Original Research // Journal of Constructional Steel Research. 2015. No. 110. Pp 29-39.
  12. Воронков Р. В. Железобетонные конструкции с листовым армированием. Ленинград: Стройиздат, 1975. 145 с.
  13. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль Г.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М.: Госстройиздат, 1974. 146 с.
  14. Применение железобетона в машиностроении: сб. статей / Под ред. И. Г. Людского. М.: Машиностроение, 1964. 503 с.
  15. Фонов В.М., Людковский И.Г., Нестерович А.П. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии // Бетон и железобетон. 1989. № 1. С. 4—6.
  16. Санжаровский Р. С. Трубобетонные конструкции в строительстве // Промышленное строительство. 1979. № 5. С. 22—23.
  17. Воронков Р.В. Некоторые особенности и конструктивные возможности применения листовой арматуры в железобетонных сооружениях. Проектирование и расчет строительных конструкций. Ленинград: ЛДНТП.1981. С. 68—75.
  18. Воронков Р. В. Новые конструктивные решения железобетонных сооружений с листовой арматурой. Ленинград: ЛДНТП, 1985. 32 с.
  19. Клименко Ф.Е., Барабаш В.М. Листовая арматура периодического профиля для железобетонных конструкций с внешним армированием // Бетон и железобетон. 1977. № 6. С. 19—22.
  20. Клименко Ф. Е. Сталебетонные конструкции с внешним полосовым армированием. Киев: Будівельник, 1984. 88 с.
  21. Клименко Ф.Е., Барабаш В.М., Павловская М.А. Прочность и деформативность преднапряженных сталебетонных балок с внешней листовой арматурой // Бетон и железобетон. 1978. № 5. С. 10—12.
  22. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Москва: Стройиздат, 1949. 280 с.
  23. Васильев А.П. Железобетон с жесткой арматурой. М.: Госстройиздат, 1941. 111 с.
  24. Васильев А.П. Проектирование железобетонных
  - of steel-concrete composite beams based on elastically supported column method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2013. No. 13(1). Pp. 1 - 29.
  5. Fridkin V.M. *Printsiipy formoobrazovaniya v teorii lineynoy protyazhennykh sooruzheniy* [The principles of forming in the theory of extended linear structures]: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Moscow, 2006. 512 p. (rus)
  6. Streletskiy N. S. *Stalezhelezobetonnyye konstruksii v nashey strane* [The composite structures in our contry]. Moscow, 1995. Pp. 126—132. (rus)
  7. Storozhenko L. I., Yefimenko V. I., Pents V.F. *Stroitelnyye konstruksii iz stalnykh trub, zapolnennykh tsentrifugirovannym betonom* [The building structures made of steel tubes, filled with spun concrete]. Kiyev: Chetverta khvilya, 2001. 144 p. (rus)
  8. Lawson R. M. Recent Trends in Composite Construction. *Concrete*. 1986. No. 20(2). Pp. 5—7.
  9. Champenois D., Corfdir A., Corfdir P. Calculating the critical buckling force in compressed bottom flanges of steel-concrete composite bridges. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014. Vol. 18(3). Pp. 271—292.
  10. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs. *Engineering Structures*. 2016. No. 114(1). Pp. 171—180.
  11. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression Original Research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. No. 110. Pp. 29—39.
  12. Voronkov R. V. *Zhelezobetonnyye konstruksii s listovym armirovaniyem* [Reinforced concrete structures with sheet reinforcement]. Leningrad: Stroyizdat, 1975. 145 p. (rus)
  13. Kikin A.I., Sanzharovskiy R.S., Trul G.A. *Konstruksii iz stalnykh trub, zapolnennykh betonom* [Construction of steel tubes filled with concrete]. Moscow: Gosstroyizdat, 1974. 146 p. (rus)
  14. *Primeneniye zhelezobetona v mashinostroyenii: sb. statey* [The use of reinforced concrete in engineering: collection of papers]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964. 503 p. (rus)
  15. Fonov V.M., Lyudkovskiy I.G., Nesterovich A.P. *Prochnost i deformativnost trubobetonnykh elementov pri osovom szhatii* [Durability and deformation of the pipe-concrete elements under axial compression]. *Beton i zhelezobeton*. 1989. No. 1. Pp. 4 6. (rus)
  16. Sanzharovskiy R.S. *Trubobetonnyye konstruksii v stroitelstve* [Pipe-concrete structures in the construction]. *Promyshlennoye stroitelstvo*. 1979. No. 5. Pp. 22 23. (rus)
  17. Voronkov R. V. *Nekotoryye osobennosti i konstruktivnyye vozmozhnosti primeneniya listovoy armatury v zhelezobetonnykh sooruzheniyakh. Proyektirovaniye i raschet stroitelnykh konstruksiy* [Some features of the design and the possibility of using sheet reinforcement in reinforced concrete structures. Design and calculation of building structures.]. Leningrad: LDNTP. 1981. Pp. 68 - 75. (rus)
  18. Voronkov R. V. *Novyye konstruktivnyye resheniya zhelezobetonnykh sooruzheniy s listovoy armaturoy* [New designs of reinforced concrete structures with sheet reinforcement]. Leningrad: LDNTP, 1985. 32 p. (rus)
  19. Klimenko F.Ye., Barabash V.M. *Listovaya armatura periodicheskogo profilya dlya zhelezobetonnykh konstruksiy s vneshnim armirovaniyem* [Steel reinforcement with periodic profile for concrete constructions with external reinforcement]. *Beton i zhelezobeton*. 1977. № 6. Pp. 19—22. (rus)
  20. Klimenko F. Ye. *Stalebetonnyye konstruksii s vneshnim*

Medvedev V.N., Semenuk S.D. Prochnost i deformativnost balochnyh izgibaemykh elementov s vneshnim listovym armirovaniyem [Durability and deformability of braced bending elements with external sheet reinforcement]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 3—15. (rus) doi: 10.5862/MCE.63.1.

- конструкций с жесткой арматурой. М.: Стройиздат, 1943. 51 с.
25. Salmon Ch.G., Fisher J.M. Composite steel-concrete construction // *Steel Structures. Design and Behavior*. Harper and Row. 1971. No.1. Pp.41-79.
  26. Чудновский Н.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование мостовых балок комбинированного сечения: автореф. дис. ... канд. техн. наук М.: МАДИ., 1956. 18 с.
  27. Стрелецкий Н.Н. Сталежелезобетонные пролетные строения мостов: 2-е изд., перераб. и доп. М: Транспорт, 1981. 360 с.
  28. Beck A.T., DaRosa E. Structural Reliability Analysis Using Deterministic Finite Element Programs // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2006. No. 3. Pp. 197-222.
  29. Padmarajaiah S.K., Ramaswamy A.A Finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement // *Cement and Concrete Composites*. 2002. No. 24. Pp. 229-241.
  30. Kim S., Lee U. Effects of delamination on guided waves in a symmetric laminated composite beam // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014 No.14. Pp. 12.
  31. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Минск: ДизайнПРО, 1997. 640 с
  32. Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений. М.: Недра, 1983. 223 с.
  33. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография. Могилев: Белорус.-Росс. Университет. 2003. 269 с.
  34. Тур В.В., Кондратчик Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил: монография. Брест: БГТУ. 2000. 400 с.
  - polosovym armirovaniyem* [Reinforced concrete structures with an external bandpass reinforcement]. Kiyev: Budivelnik, 1984. 88 p. (rus)
  21. Klimenko F.Ye., Barabash V.M., Pavlovskaya M.A. Prochnost i deformativnost prednapryazhennykh stalebetonnykh balok s vneshney listvoy armaturoy [Durability and a deformation property of prestressed concrete beams with external sheet reinforcement]. *Beton i zhelezobeton*. 1978. No 5. Pp. 10–12. (rus)
  22. Gvozdev A. A. *Raschet nesushchey sposobnosti konstruktsiy po metodu predelnogo ravnovesiya* [Calculation of bearing capacity of structures by the method of limit equilibrium]. Moscow: Stroyizdat, 1949. 280 p. (rus)
  23. Vasilyev A.P. *Zhelezobeton s zhestkoj armaturoy* [Reinforced concrete with rigid reinforcement]. Moscow: Gosstroyizdat, 1941. 111 p. (rus)
  24. Vasilyev A.P. *Proyektirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy s zhestkoj armaturoy* [Design of reinforced concrete structures with a rigid reinforcement]. Moscow: Stroyizdat, 1943. 51 p. (rus)
  25. Salmon Ch.G., Fisher J.M., Composite steel-concrete construction. *Steel Structures. Design and Behavior*. Harper and Row. 1971. No.1. Pp. 41–79.
  26. Chudnovskiy N.N. *Teoreticheskoye i eksperimentalnoye issledovaniye mostovykh balok kombinirovannogo secheniya* [Theoretical and experimental research of bridge beams with composite sections]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. Nauk. Moscow: MADI., 1956. 18 p. (rus)
  27. Streletskiy N.N. *Stalezhelezobetonnyye proletnyye stroyeniya mostov* [Reinforced concrete superstructures of bridges]. 2-ye izd., pererab. i dop. Moscow: Transport, 1981. 360 p. (rus)
  28. Beck A.T., DaRosa E. Structural Reliability Analysis Using Deterministic Finite Element Programs. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2006. No. 3. Pp. 197 - 222.
  29. Padmarajaiah S.K., Ramaswamy A. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement. *Cement and Concrete Composites*. 2002. No. 24. Pp. 229–241.
  30. Kim S., Lee U. Effects of delamination on guided waves in a symmetric laminated composite beam. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. No.14. Pp. 12.
  31. Tarasik V.P. *Matematicheskoye modelirovaniye tekhnicheskikh system* [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk: DizaynPRO. 1997. 640 p. (rus)
  32. Bolshakov V.D. *Teoriya oshibok nablyudeniya* [The theory of observation errors]. Moscow: Nedra, 1983. 223 p. (rus)
  33. Semenyuk S.D. *Zhelezobetonnyye prostranstvennyye fundamenty zhilykh i grazhdanskikh zdaniy na neravnomerno deformiruyemom osnovanii: monografiya* [Concrete dimensional foundations of residential and civil buildings on the uneven deformed basis: monograph]. Mogilev: Belorus.-Ross. universitet, 2003. 269 p. (rus)
  34. Tur V.V., Kondratchik *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy pri deystvii pererezyvayushchikh sil: monografiya* [Calculation of reinforced concrete structures under the action of shear forces: monograph]. Brest: BGTU, 2000. 400 p. (rus)

**Владимир Николаевич Медведев,**  
 +79605919763; эл. почта:  
 zpt.medvedev@gmail.com  
**Славик Денисович Семенюк,**  
 +375292733385; эл. почта:  
 prime.projekt@gmail.com

**Vladimir Medvedev,**  
 +79605919763; zpt.medvedev@gmail.com  
**Slavik Semeniuk,**  
 +375292733385; prime.projekt@gmail.com

© Медведев В.Н., Семенюк С.Д., 2016

doi: 10.5862/MCE.63.2

## Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины

### Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam

**Канд. техн. наук, доцент М.П. Саинов,**  
Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет,  
Москва, Россия

**M.P. Sainov,**  
Moscow State Civil Engineering University  
(National Research University), Moscow,  
Russia

**Ключевые слова:** плотина с железобетонным экраном; пространственное напряженно-деформированное состояние; численное моделирование; трещинообразование; периметральный шов; влияние геометрии створа

**Key words:** concrete faced rockfill dam; 3D Stress-Strain State; numerical modeling; cracking; perimetral joint; effect of foundation topography

**Аннотация.** В статье рассмотрены результаты численного моделирования пространственного напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины высотой 100 м с железобетонным экраном. Показано, что при расположении плотины в ущелье любой формы железобетонный экран сжат в направлении от борта к борту, а в направлении вдоль откоса может испытывать растяжение. Образование в экране растягивающих напряжений вызвано возникновением растягивающих усилий при смещениях каменной насыпи, а также изгибными деформациями. Изгиб экрана делает наиболее вероятным образование растяжения на нижней грани. Во всех вариантах створа происходит раскрытие периметрального шва. Большое влияние на формирование НДС экрана оказывает последовательность возведения и загрузки плотины. При возведении плотины в две очереди НДС экрана оказывается более благоприятным, чем при возведении в одну очередь: прогибы экрана, растягивающие и изгибающие усилия в нем становятся меньше, а уровень сжатия в направлении и от борта к борту растет. Однако при возведении в две очереди верхняя часть экрана первой очереди будет испытывать неблагоприятные изгибные деформации из-за неравномерности протекания осадок каменной насыпи. По указанным причинам сверхвысокие каменно-насыпные плотины с железобетонным экраном (высотой 150 м и более) могут иметь крайне неблагоприятное НДС. По результатам численного моделирования увеличение высоты плотины в 2 раза привело к росту перемещений в 3.5 раза, а напряжений в экране – в 2 раза. В экранах сверхвысоких плотин могут возникать значительные растягивающие и сжимающие напряжения, которые могут вызвать нарушение прочности бетона. Сверхвысокие плотины должны возводиться в несколько очередей, чтобы улучшить надежность работы их железобетонного экрана.

**Abstract.** The article deals with the results of numerical modeling of the 3D stress-strain state (SSS) of a 100 m high dam with reinforced concrete face. It is shown that at the location of the dam in a gorge of any shape, the reinforced concrete face is compressed in the direction from one side to the other and in the direction along the slope it may have tensile stresses. The formation of tensile stresses in the face is caused by the emergence of tensile forces at the displacement of rockfill as well as by bending deformations. The face bend contributes to the most probable formation of tension on the downstream face. In all site alternatives the perimetral joint opens. Construction sequence and dam loading have a great effect on the face SSS formation. During the dam construction in 2 stages the face SSS turns to be more favorable than when the dam is constructed in 1 stage: face deflections, tensile and bending forces in it decrease, but the level of compression from one side to the other increases. However, during the dam construction in 2 stages the first-stage face upper part will suffer unfavorable bending deformations caused by non-uniform settlements of the rockfill. Due to the aforementioned reasons, very high rockfill dams with a reinforced concrete face (150 m and higher) may have extremely unfavorable SSS. By the results of numerical modeling, twice as much increase in the dam height led to 3.5 times as much the growth of displacements and twice as much the growth of stresses in the face. In the faces of very high dams there may appear considerable tensile and compressive stresses, which may

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoe sostoyaniye zhelezobetonnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

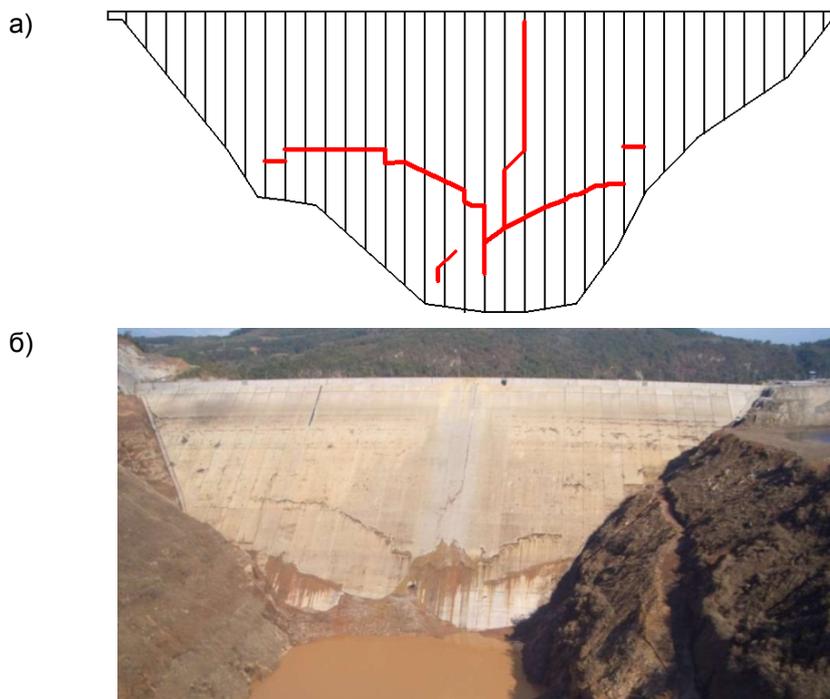
cause concrete structural failure. Very high dams should be constructed in several stages in order to improve reliability of reinforced concrete face performance.

### *Введение. Постановка задачи.*

Каменные плотины с железобетонным экраном в настоящее время весьма распространенный тип грунтовых плотин, хотя большинство из них построено в странах Латинской Америки и Китае. 7 подобных плотин имеют высоту более 200 м. Большинство высоких плотин с железобетонным экраном построены в относительно узких створах [1–2], и их напряженно-деформированное состояние (НДС) формируется в пространственных условиях.

При проектировании подобных плотин обычно считают, что железобетонный экран находится в состоянии двухосного сжатия, а арматуру устанавливают для восприятия температурно-усадочных деформаций. Однако численные исследования, ранее проведенные нами [3–5], показали, что это не так: экран может находиться в неблагоприятном НДС. В направлении вдоль откоса экран может испытывать растягивающие усилия; в направлении от борта к борту – существенные сжимающие напряжения. Некоторыми другими авторами получены похожие результаты.

Возможность формирования неблагоприятного характера НДС железобетонного экрана подтверждает опыт эксплуатации некоторых плотин, в железобетонном экране которых образовывались трещины. Трещинообразование наблюдалось в экранах плотин Shuibuya (высотой 233 м), Aguamilpa (187 м), Tianshengqiao 1 (178 м), Barra Grande (185 м), Campos Novos (202 м), Mohale (145 м) [1, 2, 6–11]. На разных плотинах трещины были ориентированы по-разному. Горизонтальные трещины возникли в экранах плотин Shuibuya, Aguamilpa; по мнению исследователей [6], эти трещины являются следствием растягивающих усилий в экране. Вертикальные трещины наблюдались в экранах плотин Tianshengqiao 1, Barra Grande и Mohale [7,10]. В них происходило разрушение защитного слоя над арматурой, что характерно для разрушения при нарушении прочности бетона на сжатие. Отмечены также случаи, когда причиной образования трещин в железобетонном экране был сложный характер его деформирования, являющийся следствием сложных топографических условий [6]. В железобетонном экране плотины Campos Novos образовалась целая система трещин, вертикальных, горизонтальных и наклонных [11] (рис. 1). Очевидно, что не последнюю роль в образовании этих трещин сыграло взаимодействие плотины со скальным каньоном.



**Рисунок 1. Расположение трещин в железобетонном экране плотины Campos Novos, образовавшихся после первого наполнения водохранилища:  
а) схема; красными линиями обозначены трещины; б) фото**

В связи с вышесказанным становится важным оценить НДС железобетонного экрана в условиях пространственной работы в скальном ущелье. В последнее время появился ряд исследований, посвященных этой теме [12–17]. В данной статье рассматриваются результаты наших численных исследований, начало которым было положено в [4–5]. В нашем исследовании ставится цель выявить степень влияния на НДС экрана таких факторов как форма ущелья, в котором построена плотина, высота плотины и последовательность возведения плотины.

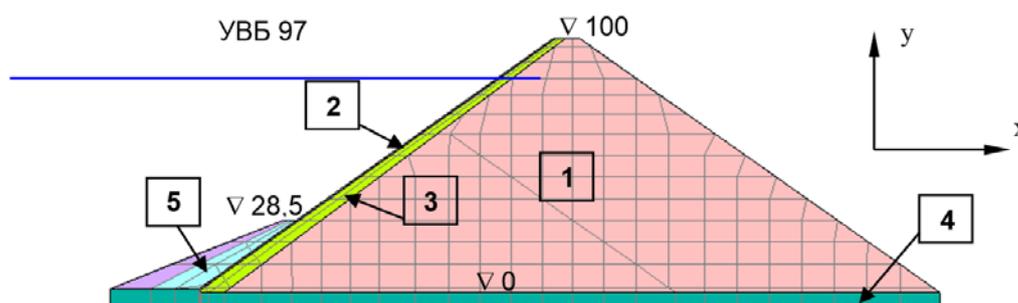
### Принципы численного моделирования

В качестве объекта исследования была выбрана абстрактная плотина высотой 100 м из горной массы с заложением откосов 1.4. Она была принята однородной, зонирование камня в теле опорной призмы не учитывалось. Толщина железобетонного экрана принята переменной – от 0.5 м на гребне до 1 м у подошвы. От скального основания экран отрезан периметральным швом, расположенным перпендикулярно к верховой грани. Экран разрезался вертикальными швами на секции шириной 12 м.

Исследования проводились методом конечных элементов (МКЭ) по вычислительной программе Nds-N, составленной М.П. Саиновым [18]. Для моделирования поведения швов в экране и взаимодействия железобетонного экрана с окружающими грунтами использовались контактные конечные элементы. В расчетах учитывалась нелинейность деформирования грунтов (по модели проф. Л.Н. Рассказова [19], [20]), а также поведения контактов (по модели Кулона–Мора).

Параметры деформируемости каменной насыпи были выбраны такими, чтобы в плоской задаче ее максимальные строительные осадки составили 54 см, что вписывается в результаты натуральных наблюдений за рядом плотин [21]. Если принимать модель линейного деформирования камня, то данная осадка может быть получена при модуле деформации  $E \approx 60$  МПа. Модуль деформации бетона экрана был принят равным 29000 МПа.

Сетка МКЭ для поперечного сечения, в котором плотина имеет максимальную высоту, показана на рисунке 2. Для моделирования железобетонного экрана и прилегающих к нему зон использовались конечные элементы с квадратичной аппроксимацией перемещений, так как наши предварительные исследования показали, что только такой подход может обеспечить получение приемлемых результатов. При использовании элементов низкого порядка распределение напряжений в тонкостенной конструкции экрана получается не гладким, а со скачками на границах конечных элементов. Квазилинейные конечные элементы использовались только для моделирования каменной насыпи. В сетку МКЭ был включен неглубокий блок скального основания плотины.



**Рисунок 2. Сетка МКЭ плотины в поперечном сечении:**

**1 – упорная призма; 2 – железобетонный экран; 3 – подэкрановая зона; 4 – скальное основание; 5 – защитная призма**

При расчетах учитывалась последовательность возведения и загрузки плотины. Была принята схема поэтапности, предусматривающая наполнение водохранилища до НПУ 97 м и возведения железобетонного экрана только после возведения плотины на полный профиль.

Влияние формы створа выявлялось путем сравнения НДС между несколькими расчетными вариантами геометрии речной долины. Во всех вариантах форма ущелья принималась трапецеидальной. Варианты различались наклоном бортов и шириной руслового участка плотины. Заложение бортового склона принималось равным 0.5, 1 или 2, ширина русловой части – 12, 48 или 108 м. Всего было получено 9 вариантов конфигурации створа. Варианты обозначены Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnoyego ekrana kamennonasyypnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

двойной нумерацией. Цифра указывает на уклон борта, а буква кодирует ширину русла. Параметры створов указаны в таблице 1. Там же указаны количественные параметры сеток МКЭ для различных вариантов конфигурации створов.

**Таблица 1. Параметры вариантов створов и сеток МКЭ (плотина высотой 100 м)**

вариант	Параметры створа			Параметры сетки МКЭ		
	ширина русловой части, м	заложение склона бортов	длина по гребню, м	конечных элементов	угловых узлов	степеней свободы
1a	216	2	610	4629 + 1444	6870	38070
1b	96	2	490	3219 + 1024	4855	26690
1c	24	2	418	2373 + 772	3646	19862
2a	216	1	511	4125 + 1274	6091	33726
2b (№0)	96	1	391	2715 + 854	4076	22346
2c	24	1	319	1869 + 602	2867	15516
3a	216	0,5	389	4629 + 1284	6603	36017
3b	96	0,5	293	3501 + 948	4991	26914
3c	24	0,5	221	2655 + 696	3782	20085

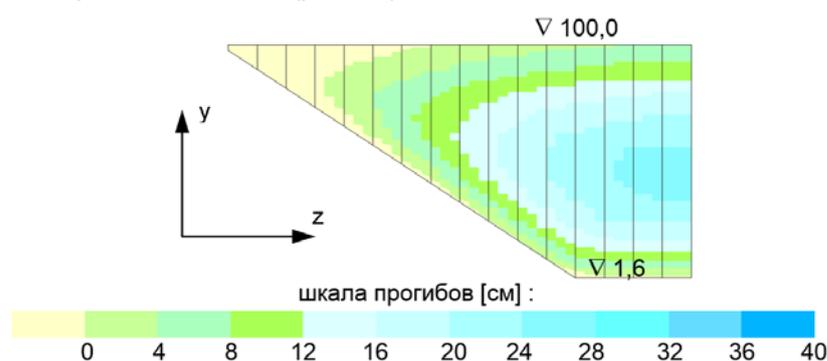
Примечание: Отдельно указано количество элементов сплошной среды и контактных элементов

### **Анализ результатов численного моделирования НДС плотины высотой 100 м при ее возведении и загрузке в одну очередь**

Сначала рассмотрим НДС среднего варианта №2b, который будем называть вариант №0. В этом варианте ширина русловой части створа составляет 96 м, а уклон скальных бортов –  $1^1$ . Соответственно, коэффициент створа составляет 3.9, это достаточно широкий створ.

Расчетами для варианта №0 получено, что максимальные строительные осадки плотины составляют 52.9 см, они наблюдаются примерно в геометрическом центре плотины, на оси створа. Максимальные горизонтальные смещения плотины в створе составили 13.6 см.

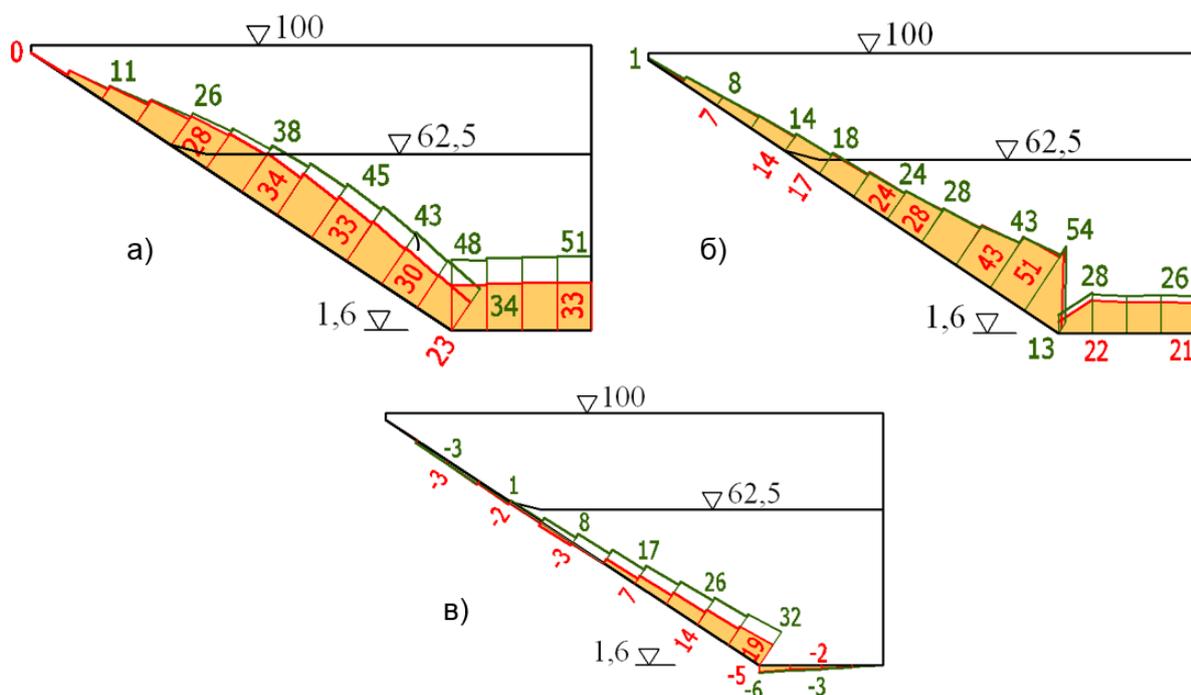
Железобетонный экран, следуя за деформациями каменной насыпи, испытывает изгиб в двух направлениях (вдоль и поперек откоса). Максимальный прогиб (29.3 см) наблюдается в центре экрана (рис. 3а), а прогибы по контуру экрана существенно меньше. Контурные прогибы являются следствием сдвиговых смещений в периметральном шве в направлении поперек откоса. Максимальный краевой прогиб экрана (54 мм) наблюдается на участке скального борта плотины, а в русловой части он не превышает 28 мм (рис. 4б).



**Рисунок 3. Прогибы железобетонного экрана в варианте № 0 (возведение без очередей)**

Деформации экрана сопровождаются раскрытием периметрального шва (рис. 4а). Максимальное раскрытие шва на русловом участке составило 51 мм, на бортовом – 45 мм. Кроме того, происходят сдвиговые перемещения вдоль контура периметрального шва, в плоскости экрана (рис. 4в). На русловом участке смещения направлены в сторону русла, а на бортовом – в основном от подошвы к гребню. На наклонном участке примыкания к борту они достигают 32 мм.

<sup>1</sup> Поскольку створ принимался симметричным, то моделировалась только левобережная половина плотины. Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.



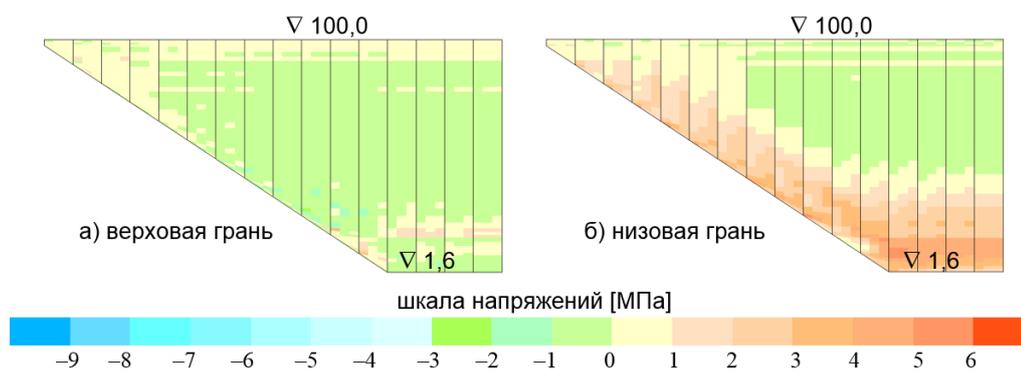
**Рисунок 4. Перемещения в периметральном шве экрана варианта №0:**  
**а) раскрытия; б) контурные прогибы; в) продольные смещения.**  
**Закрашенные эпюры соответствуют схеме возведения плотины в 2 очереди,**  
**незакрашенные – схеме возведения без очередей**

Описанная схема деформирования экрана приводит к появлению в экране как сжимающих, так и растягивающих напряжений. При этом на низовой грани экрана уровень растяжения больше чем на верховой, а сжатия, наоборот, меньше. Это связано с изгибом плиты экрана.

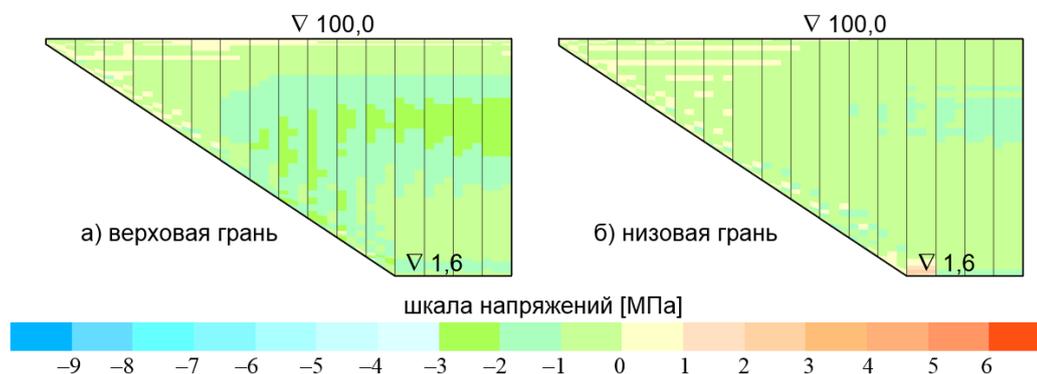
В направлении, близком к направлению вдоль откоса, в экране чаще всего действуют либо максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  (рис. 5), либо промежуточные главные напряжения  $\sigma_2$  (рис. 6). В нижней части экран испытывает растягивающие напряжения  $\sigma_1$  в направлении вдоль откоса, а сжимающие напряжения  $\sigma_2$  соответствуют гидростатическому давлению и направлены поперек плоскости экрана. Верхняя часть экрана имеет другое напряженное состояние, в ней экран сжат во всех направлениях. В направлении вдоль откоса действуют напряжения  $\sigma_2$ , а напряжения  $\sigma_1$  соответствуют гидростатическому давлению верхнего бьефа.

Опасность представляют растягивающие напряжения  $\sigma_1$  в нижней части экрана. На верховой грани зона растягивающих напряжений  $\sigma_1$  ориентирована горизонтально, то есть вероятно появление горизонтальных трещин. Однако зона растяжения невелика по площади, а максимальное значение  $\sigma_1$  не превышает 1.3 МПа (рис. 5а). Такое напряжение может быть воспринято продольной арматурой экрана.

На низовой грани экрана проявление растяжения более значительно – область растягивающих напряжений  $\sigma_1$  занимает всю нижнюю часть экрана. Она расположена широкой полосой вдоль периметрального шва. Появление в этой зоне растягивающих напряжений вызвано изгибом экрана в области примыкания к скальному основанию. Эта зона растяжения образуется как на русловом, так и на бортовом участках, но на бортовом участке растягивающие напряжения  $\sigma_1$  все же несколько меньше по величине. Это связано с тем, что там экран имеет большую свободу в перемещениях и за счет повышенных краевых прогибов он способен уменьшить изгибные деформации. Максимальные значения растягивающих напряжений  $\sigma_1$  наблюдаются на границе бортового и руслового участков, где они достигают 5.6 МПа (рис. 5б). Такое значение много больше нормативной прочности железобетона на растяжение и может привести к образованию в экране трещин. Эти трещины будут ориентированы вдоль примыкания к скале.

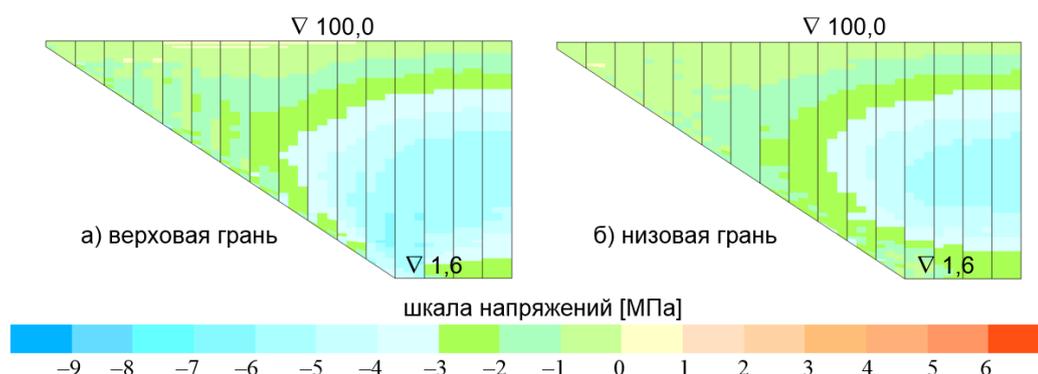


**Рисунок 5. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  в железобетонном экране варианта №0 (возведение без очередей)**



**Рисунок 6. Промежуточные главные напряжения  $\sigma_2$  в железобетонном экране варианта №0 (возведение без очередей)**

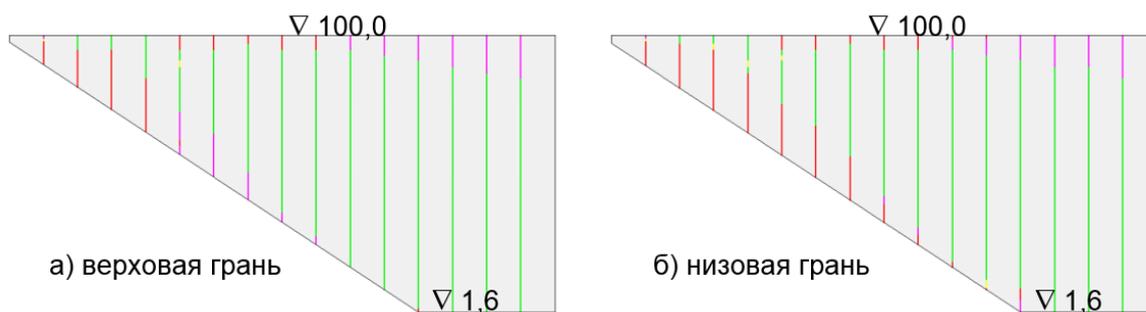
В направлении от борта к борту экран практически по всей площади сжат минимальными главными напряжениями  $\sigma_3$ . Сжимающие минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на верховой грани достигают 6.9 МПа (рис. 7а), а на низовой – 5.7 МПа (рис. 7б). Область наибольшего сжатия по  $\sigma_3$  располагается в центре экрана, а также в зоне сопряжения руслового и бортового участков плотины. Сжатие экрана в направлении от борта к борту говорит о том, что с точки зрения восприятия статических нагрузок необходимость устройства в экране вертикальных швов отсутствует. Хотя, как показывают натурные наблюдения за плотиной Num Ngun2, возможны неравномерности деформаций [22], и тогда швы могут сыграть положительную роль.



**Рисунок 7. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  в железобетонном экрана варианта №0 (возведение без очередей)**

Состояние вертикальных швов на момент окончания заполнения водохранилища показано на рисунке 8. Вертикальные межсекционные швы раскрываются только в крайних бортовых секциях, где уровень сжатия минимален (рис. 8). Раскрытия швов очень малы и составляют доли миллиметра. Красным выделены раскрытые швы, розовым – сомкнутые швы, ранее раскрывавшиеся, зеленым – сомкнутые швы без сдвиговых нарушений, желтым – сомкнутые швы со сдвиговыми нарушениями.

Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.



**Рисунок 8. Состояние межсекционных швов в экране варианта №0 (возведение без очередей)**

Далее исследовалось НДС экрана для других вариантов конфигурации створа.

На рисунках 9–16 представлены результаты расчета НДС только для вариантов № 1а, 1с, 3а, 3с как наиболее отличающихся друг от друга и от варианта №0.

Во всех вариантах максимальные прогибы экран получает на русловом участке, на бортовом участке они существенно уменьшаются (рис. 9).

Анализ (табл. 2) показывает, что во всех широких (варианты 1а, 1б, 2а, 3а) створах прогибы экрана примерно одинаковы – 29...30 см. В узких створах максимальный прогиб экрана уменьшается. Минимальное значение прогиба (22.6 см) экран имеет в варианте 3с, в котором скальное ущелье самое узкое. По сравнению с прогибом в варианте №0 данный прогиб меньше на 23 %.

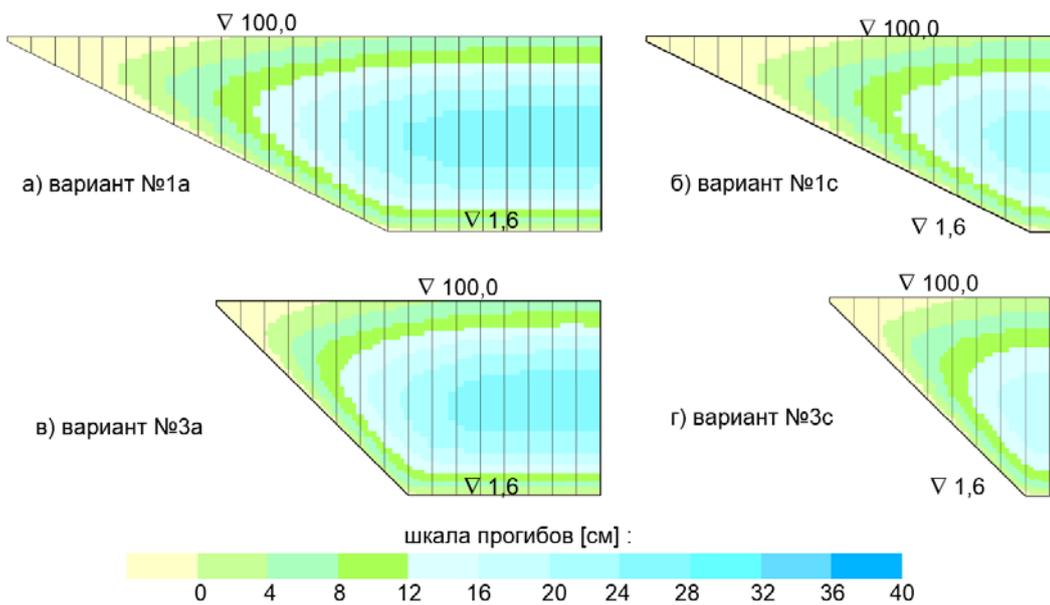
Во всех вариантах контурные прогибы не равны 0 практически на всем протяжении периметрального шва (рис. 10). Характерно, что максимальные прогибы наблюдаются на бортовом участке плотины и составляют около 50 мм. В русловой части прогибы не превышают 30 мм, при этом сужение русловой части створа очень мало уменьшает величины контурных прогибов. Таким образом, конфигурация створа мало влияет на величины контурных прогибов экрана.

**Таблица 2. Максимальные перемещения (см) экрана и плотины различных вариантов створа (возведение плотины высотой 100 м без очередей)**

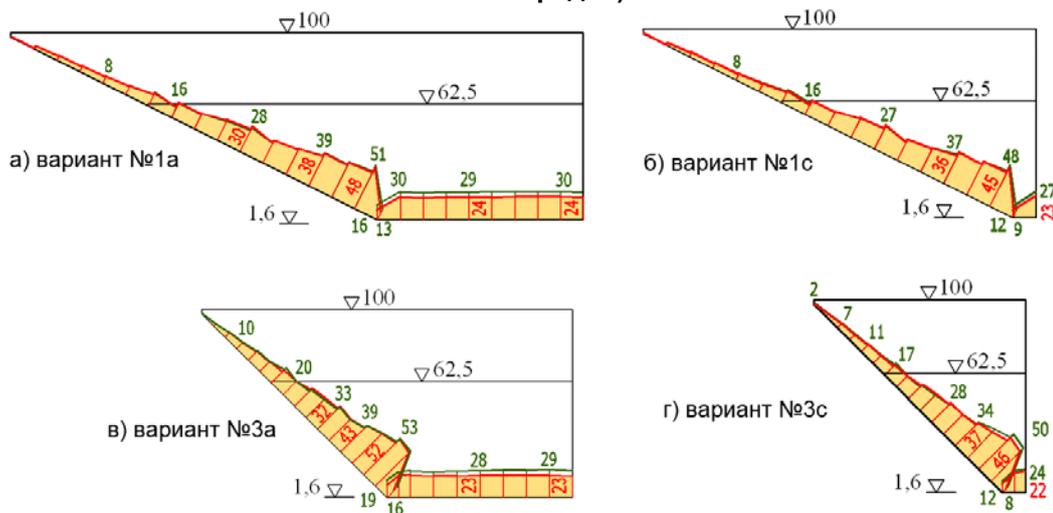
вариант	экран				ось плотины	
	ux	uy	uz	un	ux	uy
1а	23.1	21.0	2.7	30.5	16.1	53.6
1б	22.3	21.4	2.4	30.4	14.3	53.0
1с	19.0	18.8	1.9	26.3	11.6	47.6
2а	23.0	21.1	2.9	30.5	16.0	53.6
2б (№0)	21.3	20.8	2.4	29.3	13.6	52.9
2с	17.1	17.4	1.7	24.1	10.3	45.3
3а	22.9	21.5	3.1	30.8	15.4	54.1
3б	20.9	21.1	2.4	29.3	12.7	52.8
3с	15.5	16.7	1.5	22.6	8.4	40.3

**Таблица 3. Контурные перемещения экрана (мм) для различных вариантов створа (возведение плотины высотой 100 м без очередей)**

вариант	продольные		раскрытие		прогиб	
	русло	борт	русло	борт	русло	борт
1a	11	28	63	55	30	51
1b	6	30	55	51	29	50
1c	2	28	44	43	27	48
2a	12	31	62	51	30	56
2b (№0)	6	32	51	45	28	54
2c	2	27	37	34	26	50
3a	10	35	59	46	29	53
3b	5	33	47	38	27	52
3c	2	25	30	25	24	50



**Рисунок 9. Прогибы железобетонного экрана в створах разной конфигурации (возведение без очередей)**



**Рисунок 10. Контурные прогибы (мм) железобетонного экрана в периметральном шве для створов разной конфигурации (плотина высотой 100 м). Условные обозначения см. на рисунке 4**

Во всех вариантах периметральный шов практически полностью раскрыт (рис. 11), даже в самом узком створе. Но величины раскрытий зависят от конфигурации скального ущелья. В узких Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.

створах и в створах с крутыми бортами раскрытие меньше. В самом узком створе (вариант 3с) раскрытие составляет 30 мм, что более чем в два раза больше (63 мм), чем в самом широком створе (вариант 1а).

Продольные смещения происходят в основном внизу бортового участка экрана. Они достигают 25...30 мм (рис. 12).

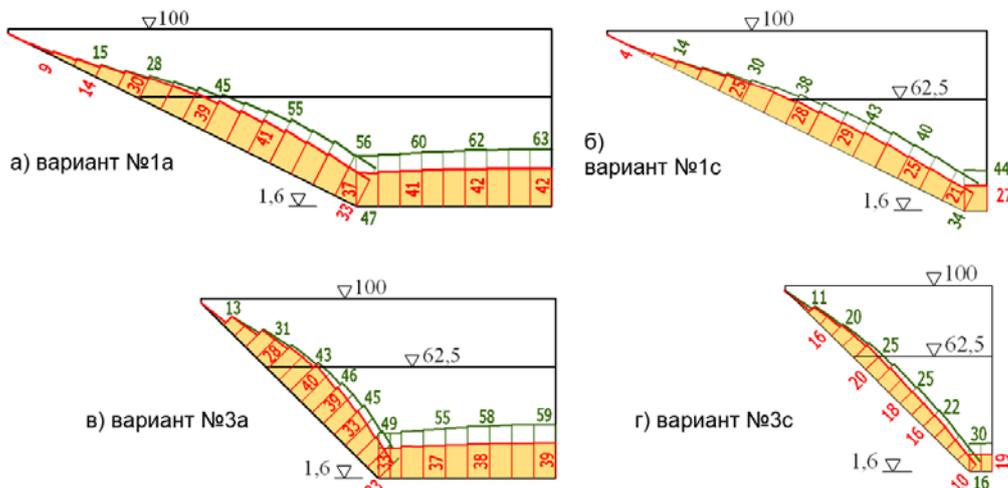


Рисунок 11. Раскрытия периметрального шва (мм) в створах разной конфигурации (плотина высотой 100 м). Условные обозначения см. на рисунке 4

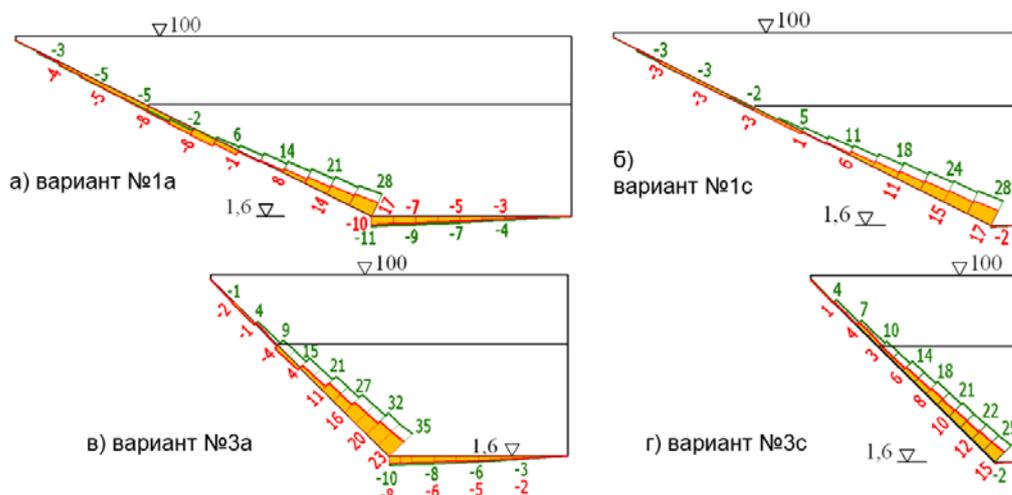


Рисунок 12. Продольные смещения экрана в периметральном шве (мм) в створах разной конфигурации (плотина высотой 100 м). Условные обозначения см. на рисунке 4

Таким образом, во всех вариантах экрана качественно картина деформаций не отличается. Соответственно, схожа во всех вариантах и картина распределения напряжений (рис. 13–16).

Анализ напряженного состояния экрана в широких створах показал, что оно качественно аналогично рассмотренному ранее в варианте №0, хотя происходит некоторое расширение зоны растяжения  $\sigma_1$  (рис. 13а, 13в, 14а, 14в) и сокращение зоны сжимающих напряжений  $\sigma_3$  грани (рис. 15 а,в). Изменяются и величины максимальных значений напряжений. В варианте №1 увеличение  $\sigma_1$  произошло до 6.5 МПа, (рис. 13а), а уменьшение сжимающих напряжений  $\sigma_3$  – до 3.8 МПа (рис. 14а).

В узком створе происходит наоборот: область растягивающих напряжений  $\sigma_1$  сокращается, а сжимающие напряжения  $\sigma_3$  интенсифицируются. Например, в варианте №3с растяжения на верхней грани практически не наблюдается (рис. 13г). Но максимальное напряжение  $\sigma_1$  на нижней грани увеличилось до 7.5 МПа (рис. 14г). Максимальное сжимающее главное напряжение  $\sigma_3$  в варианте 3с на нижней грани достигло 6.3 МПа (рис. 16г), а на верхней – 8.7 МПа (рис. 15г).

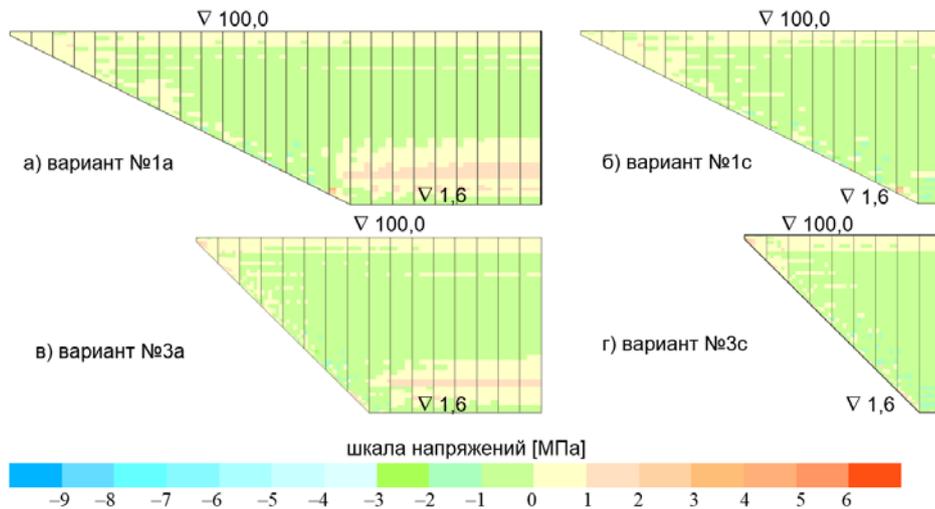


Рисунок 13. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)

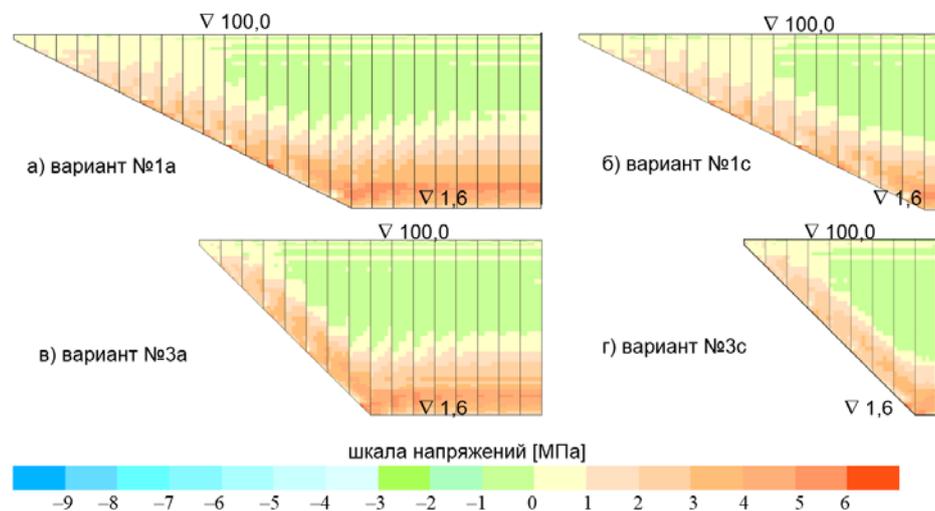


Рисунок 14. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)

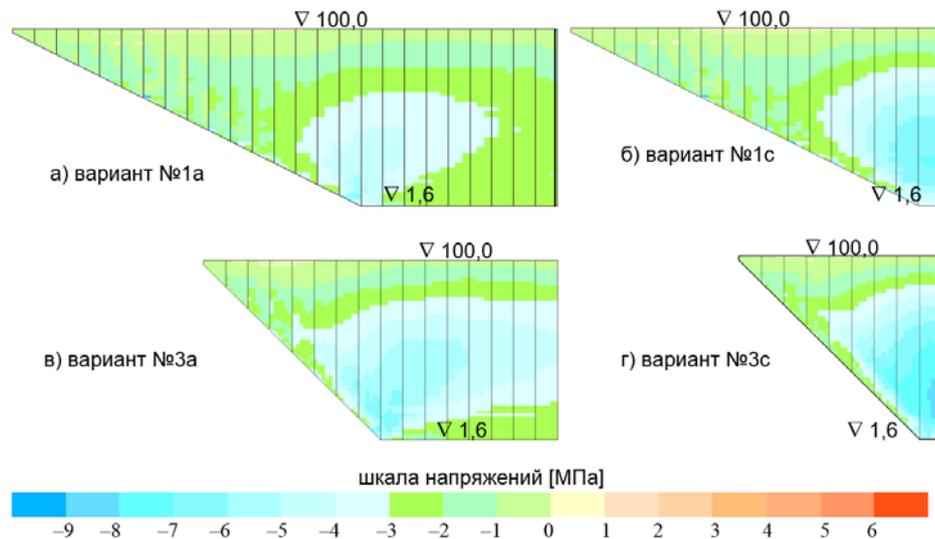
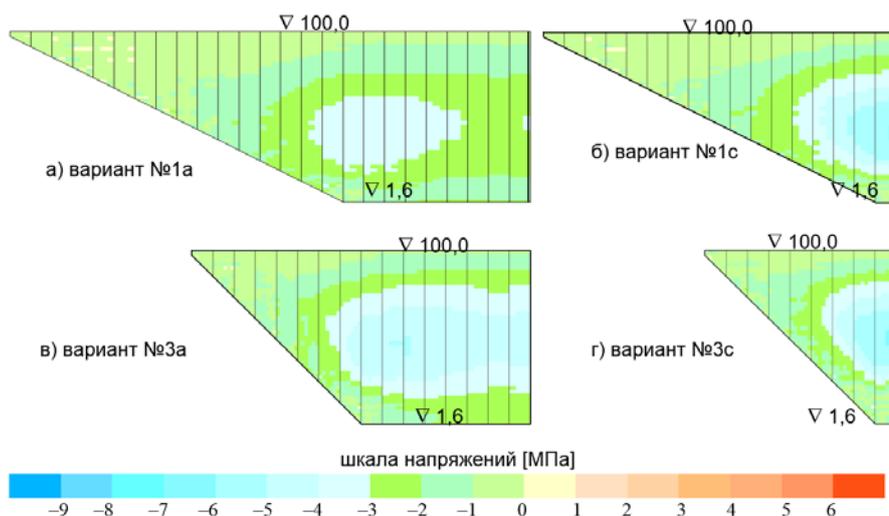
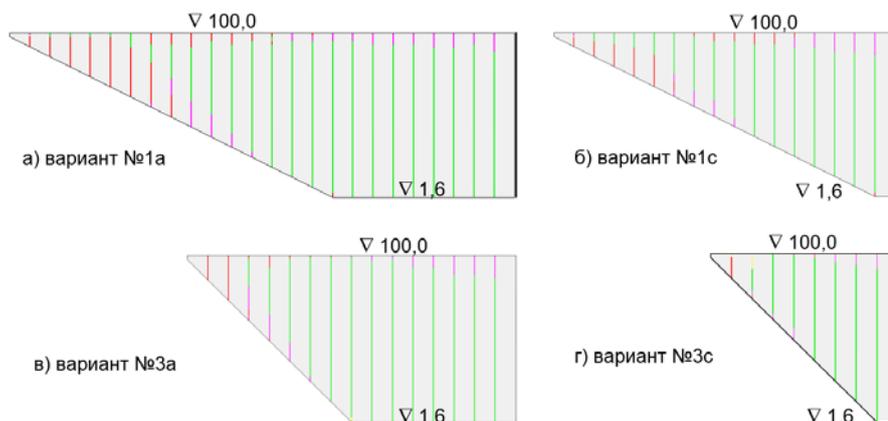


Рисунок 15. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)



**Рисунок 16. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)**

Область раскрытия межсекционных швов во всех вариантах располагается только в крайних секциях (рис. 17).



**Рисунок 17. Состояние межсекционных швов на верхней грани экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей). Условные обозначения см. на рисунке 8**

### **Анализ результатов численного моделирования НДС плотины высотой 100 м при схеме ее возведения в 2 очереди**

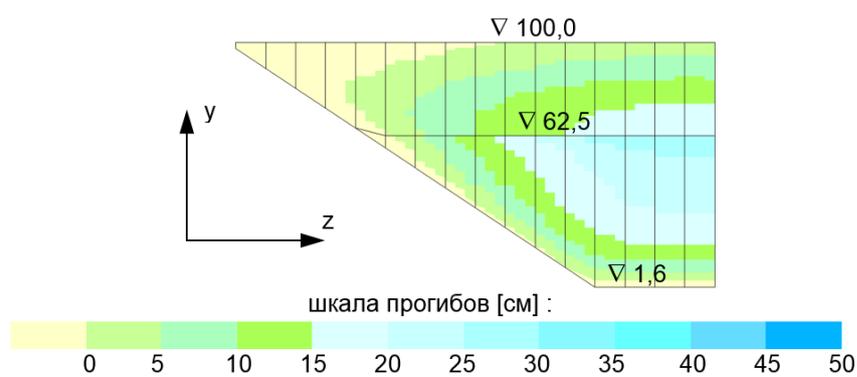
Рассмотренная ранее схема возведения высокой плотины сразу на всю высоту является идеализированной, не осуществляемой на практике. Обычно экран устраивают параллельно с отсыпкой тела плотины, но с некоторым отставанием. При этом еще до завершения отсыпки возможно и наполнение водохранилища до некоторой промежуточной отметки. Поэтому рассмотрим, как влияет очередность возведения плотины на условия формирования НДС ее железобетонного экрана.

Для этого были проведены расчеты для схемы возведения плотины в две очереди. Высота первой очереди плотины была принята равной 62.5 м, то есть более 60 % от общей высоты плотины. Схема строительства в две очереди предусматривала, что сначала будет отсыпана первая очередь плотины, устроен ее железобетонный экран и защитная призма, затем произойдет частичное заполнение водохранилища, и лишь затем будут проводиться работы по отсыпке второй очереди плотины. На второй очереди строительства сначала будет отсыпано тело каменной насыпи, затем уложен железобетонный экран и в завершение водохранилище наполнится до НПУ 95 м.

Результаты расчетов НДС представлены на рисунках 18–22, а также 10–12.

Анализ результатов, полученных для варианта №0, показывает, что изменение последовательности возведения и загрузки плотины существенно сказалось на условиях работы железобетонного экрана и его НДС. При возведении плотины сразу на всю высоту железобетонный экран участвует в восприятии деформаций плотины только от гидростатического давления водохранилища – нагрузки от собственного веса грунтовой плотины на него не передаются. При возведении плотины в две очереди экран вынужден испытывать деформации каменной насыпи не только от гидростатического давления, но и от веса плотины второй очереди.

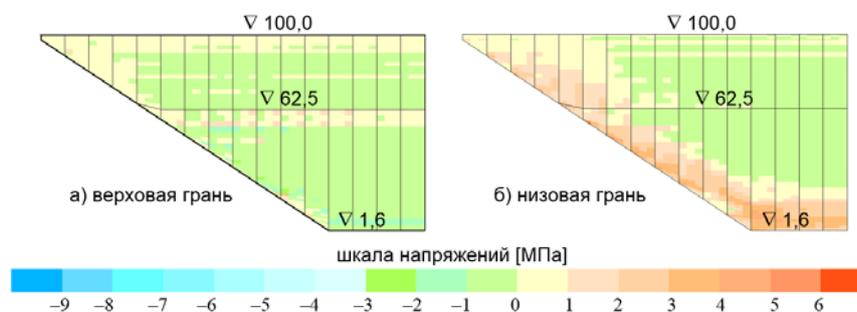
При восприятии веса второй очереди насыпь первой очереди получает небольшие дополнительные осадки, а также смещается в сторону верхнего бьефа на 2...4 см. За счет этого при наполнении водохранилища уменьшаются окончательные горизонтальные смещения плотины в сторону верхнего бьефа, возникающие при наполнении водохранилища. Уменьшение горизонтальных смещений благоприятно сказывается на НДС экрана. На большей части площади экрана его прогибы уменьшаются на величину до 2 см (рис. 18). Однако максимальный прогиб экрана возрос с 29.3 см до 34.6 см. Такой прогиб экран получает на гребне плотины первой очереди (рис. 18). Это связано с неравномерными осадками каменной насыпи первой очереди под действием веса плотины второй очереди. В этой зоне экран испытывает сильный изгиб в сторону нижнего бьефа.



**Рисунок 18. Прогибы железобетонного экрана в варианте №0 (возведение в две очереди)**

Изменение схемы деформирования привело к изменению и напряженного состояния экрана. Качественно общая картина распределения напряжений в экране осталась прежней: экран сжимается в направлении от борта к борту, а растягивающие напряжения в направлении вдоль экрана наблюдаются в нижней части экрана. Различия состоят в следующем.

Во-первых, появилось различие между напряженным состоянием экрана первой и второй очереди. В экране второй очереди общий уровень напряжений меньше, чем в экране первой очереди, т.к. нагрузки, воспринимаемые экраном первой очереди, возросли, а второй очереди – упали. На границе между экраном первой и второй очереди разница в напряженном состоянии становится хорошо заметна. Например, зона максимумов сжимающих напряжений  $\sigma_3$  переместилась из центра экрана к гребню плотины первой очереди (рис.19) – туда же, куда переместилась зона максимальных прогибов (рис. 18).



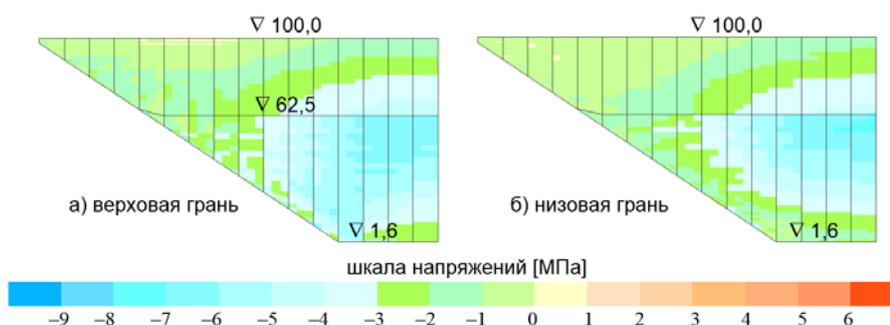
**Рисунок 19. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  в железобетонном экране варианта №0 для створов разной конфигурации (возведение плотины в две очереди)**

Во-вторых, экран первой очереди стал испытывать дополнительное сжатие под действием веса плотины второй очереди. Появление продольного сжимающего усилия привело к тому, что область растягивающих напряжений  $\sigma_1$  в направлении вдоль экрана уменьшилась. На верховой Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.

границы, в нижней части экрана зона растяжения по  $\sigma_1$  исчезла полностью (рис. 19а). В направлении вдоль экрана на большей части верховой грани экрана действуют сжимающие напряжения  $\sigma_2$ . На низовой грани растягивающие напряжения  $\sigma_1$  также уменьшились. Их максимальное значение уменьшилось с 5.6 МПа до 4.8 МПа (рис. 19б). Таким образом, по напряжениям  $\sigma_1$  напряженное состояние экране стало в целом более благоприятным.

Дополнительные осадки и смещения, которые стал испытывать экран первой очереди, привели и к росту сжатия в направлении от борта к борту по напряжениям  $\sigma_3$ . Общий уровень сжатия возрос. Максимальное значение  $\sigma_3$  в верхней части экрана первой очереди составило 6.9 МПа на верховой грани (рис. 20а), что больше, чем при возведении плотины в одну очередь (6.0 МПа, рис. 7а).

В-третьих, в напряженном состоянии экрана проявились особенности деформирования плотины при ее двухочередном возведении. Как видно на рис. 18, верхняя часть экрана первой очереди испытывает повышенные прогибы. Следствием этих повышенных прогибов являются местные изгибные деформации верхней части экрана первой очереди. Изгиб вызвал появление в верхней части экрана растягивающих напряжений  $\sigma_1$  на верховой грани экрана (до 1.4 МПа, рис. 19а) и увеличение сжимающих напряжений  $\sigma_3$  на низовой грани экрана до 7.5 МПа (рис. 20б). Это говорит о том, что при возведении плотины в несколько очередей траектории напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  становятся более сложными и не отклоняются от направлений вдоль откоса и от борта к борту.



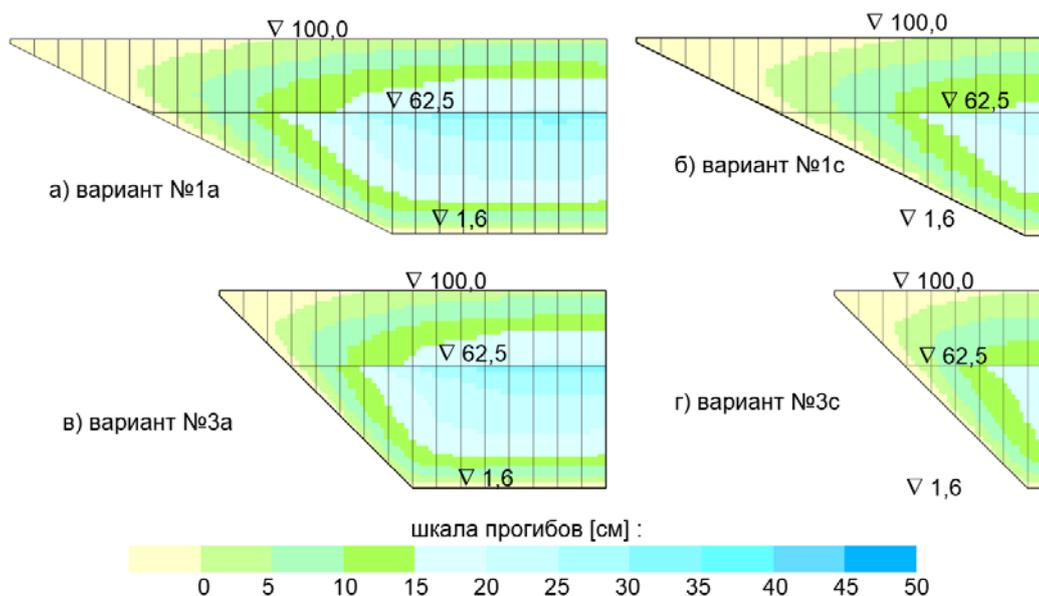
**Рисунок 20. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  в железобетонном экране варианта №0 для створов разной конфигурации (возведение плотины в две очереди)**

Все описанные выше особенности НДС железобетонного экрана плотины, возведенной в две очереди, характерны и для других вариантов конфигурации створа.

На рисунке 21 и в таблице 3 представлена информация о прогибах железобетонного экрана. В широких створах прогибы экрана при двухочередном возведении увеличились по сравнению с прогибами в случае возведения без очередей примерно на 20 %, а в узком створе (вариант 3с) – на 10 %. Для всех вариантов характерно локальное увеличение прогибов экрана в верхней части первой очереди.

**Таблица 4. Максимальные перемещения (см) экрана и плотины для различных вариантов конфигурации створа (возведение плотины в две очереди)**

вариант	экран				ось плотины	
	$u_x$	$u_y$	$u_z$	$u_n$	$u_x$	$u_y$
1а	25.1	28.0	3.0	37.3	16.5	52.7
1б	23.1	26.6	2.5	35.1	14.2	52.0
1с	19.3	22.8	1.9	29.8	11.5	46.5
2а	24.7	27.7	3.2	36.9	16.4	52.7
2б (№0)	22.6	26.4	2.6	34.6	13.6	51.8
2с	17.9	21.6	1.8	28.0	10.5	44.7
3а	24.6	28.0	3.5	37.1	16.0	53.1
3б	21.8	25.9	2.6	33.8	12.8	51.5
3с	15.6	19.4	1.5	24.9	8.6	42.8



**Рисунок 21. Прогибы железобетонного экрана в створах разной конфигурации (плотина высотой 100 м, возведение в две очереди)**

На рисунках 10–12 показаны перемещения экрана в периметральном шве для различных вариантов конфигурации створа, а в таблице 4 указаны их максимальные величины.

Во всех вариантах при переходе на схему возведения в две очереди произошло существенное уменьшение раскрытий периметрального шва (рис. 11). Максимальные раскрытия на русловом участке уменьшились на 33...39 %, а на бортовом – на 13...33 %. При этом уменьшение прогибов более интенсивно проявлялось в узких створах.

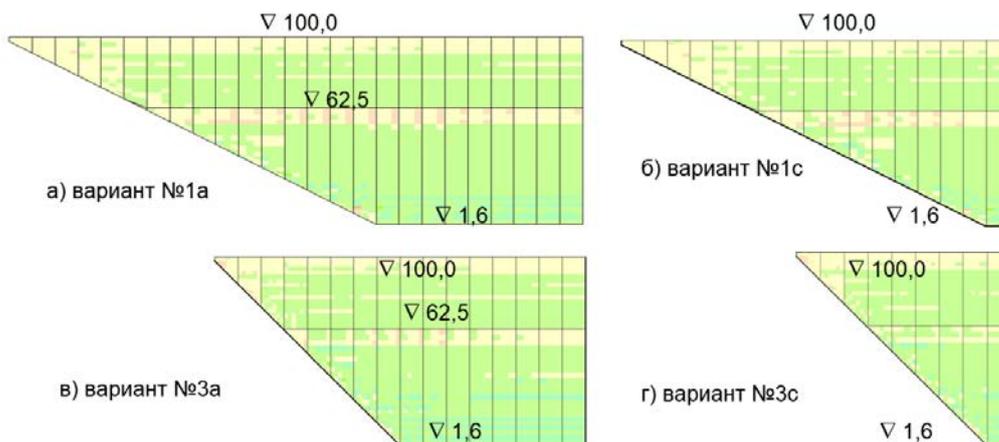
Контурные прогибы экрана (рис. 10) также уменьшились незначительно. На бортовом участке максимальные значения контурных прогибов уменьшились на 8...19 %, а на русловом – лишь на 2...8 %.

Большое влияние последовательность возведения плотины оказала на величины смещений экрана вдоль контура периметрального шва. Их максимальные величины на бортовом участке снизились на 34...50 % (рис. 12) по сравнению со схемой строительства в одну очередь.

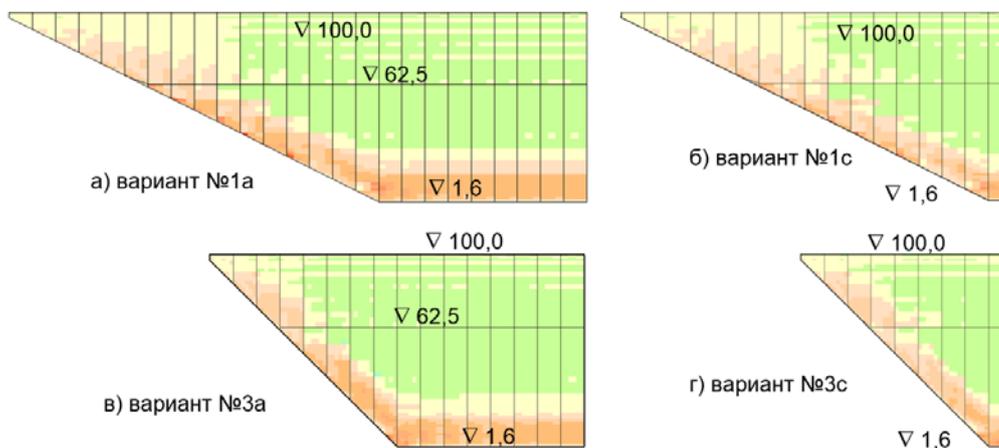
**Таблица 5. Контурные перемещения экрана (мм) для различных вариантов конфигурации створа (возведение плотины в две очереди)**

вариант	продольные		раскрытие		прогиб	
	рухло	борт	рухло	борт	рухло	борт
1a	10	14	42	41	25	48
1b	5	18	35	36	24	46
1c	2	17	27	29	23	45
2a	10	19	41	41	25	53
2b (№0)	5	19	33	34	23	51
2c	2	16	23	25	23	49
3a	8	23	39	40	24	52
3b	4	21	30	30	22	50
3c	2	15	19	20	22	46

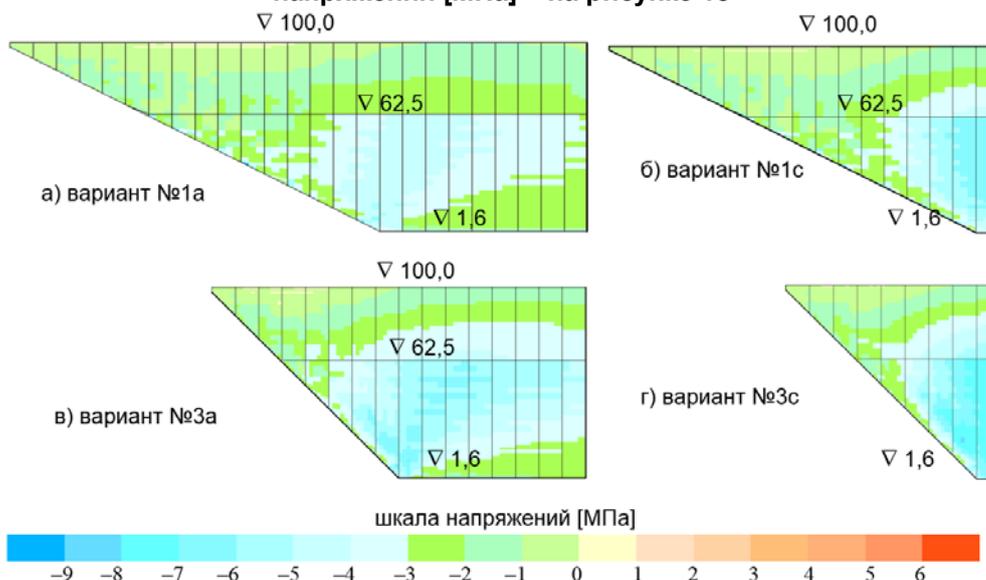
На рисунках 22–24 показано распределение в экранах разной конфигурации главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Во всех вариантах при переходе на схему возведения в две очереди НДС экрана претерпело изменения, аналогичные описанным ранее для варианта №0. Но ни в одном из вариантов уровень растягивающих напряжений  $\sigma_1$  на низовой грани не упал до безопасного уровня.



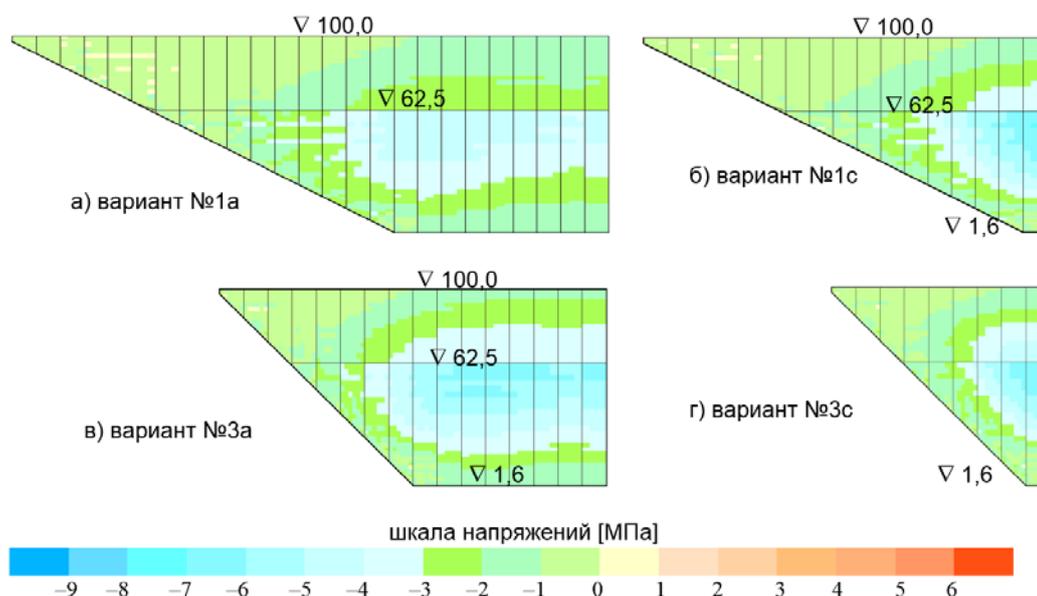
**Рисунок 22. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в 2 очереди). Шкала напряжений [МПа] – на рисунке 18**



**Рисунок 23. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в 2 очереди). Шкала напряжений [МПа] – на рисунке 18**



**Рисунок 24. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в две очереди)**



**Рисунок 25. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в две очереди)**

### *Анализ влияния высоты плотины на формирование НДС плотины с железобетонным экраном*

Для оценки НДС сверхвысоких плотин были выполнены исследования для плотины высотой 200 м. Для удобства сравнения рассматривалась плотина, все геометрические параметры которой и вмещающего ее ущелья ровно в 2 раза больше, чем у ранее рассмотренной плотины высотой 100 м. Соответственно, толщина железобетонного экрана плотины составила 1 м на гребне плотины и 2 м у подошвы.

При расчетах рассматривалась схема возведения плотины в две очереди. Высота плотины первой очереди составила 125 м.

Учитывая тот факт, что плотины высотой 200 м и более построены в ущельях с коэффициентом створа менее 4, на рисунках показаны результаты НДС только для вариантов №1с, 2б, 3а, 3с.

Результаты моделирования НДС плотины высотой 200 м представлены на рисунках 26–33. Их анализ показывает, что сверхвысокие плотины испытывают большие перемещения и напряжения. Например, в варианте №0 максимальные строительные осадки  $u_y$  на оси плотины составили 182 см, а максимальные горизонтальные смещения  $u_x$  – 46 см. Сравнивая их с перемещениями плотины высотой 100 м, можно увидеть, что увеличение высоты плотины в 2 раза привело к увеличению осадок в 3.5 раза, смещений – в 3.4 раза.

Примерно во столько же раз увеличились и перемещения железобетонного экрана. В варианте №0 максимальный прогиб железобетонного экрана составил 119 см. Информация о перемещениях плотины и экрана для всех расчетных вариантах показана на рисунке 26 и в таблице 5.

Примерно в 3.5 раза увеличились и перемещения экрана в периметральном шве (рис. 27–29, табл. 8). В варианте №0 раскрытие шва на русловом участке достигло 110 мм. Это раскрытие очень велико, оно не может быть воспринято уплотнением шва. В реально построенных сверхвысоких плотинах таких раскрытий не наблюдалось [1, 2]. Однако следует иметь в виду, что рассмотренная нами схема последовательности возведения не характерна для сверхвысоких плотин. Такие плотины возводятся не в две очереди, а более сложным образом. При этом плотины первой очереди имеют не обжатый, а распластаный профиль. Рассматриваемая задача имеет методический характер, ее цель – выявить, как высота плотины влияет на НДС железобетонного экрана.

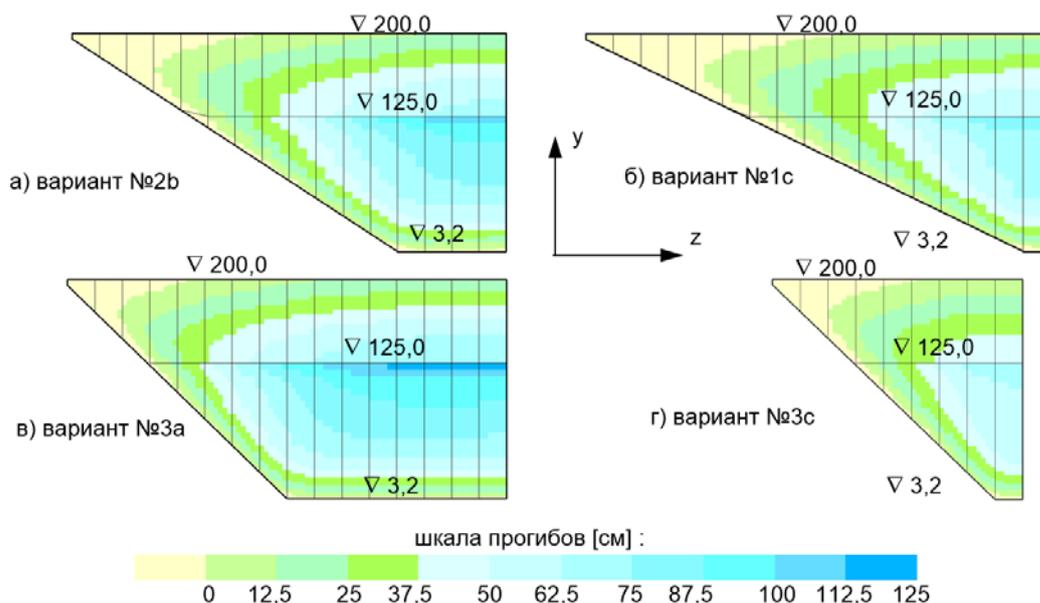


Рисунок 26. Прогибы железобетонного экрана плотины высотой 200 м

Таблица 6. Максимальные перемещения (см) экрана и плотины для различных вариантов конфигурации створа (плотина высотой 200 м)

вариант	экран				ось плотины	
	u <sub>x</sub>	u <sub>y</sub>	u <sub>z</sub>	u <sub>n</sub>	u <sub>x</sub>	u <sub>y</sub>
1a	86.3	96.6	10.6	128.8	53.6	187
1b	80.2	94.1	9.0	123.2	47.8	183
1c	64.6	75.9	6.3	99.3	40.3	165
2a	85.2	97.1	11.4	128.5	54.7	185
2b (№0)	77.3	91.3	9.1	119.2	46.0	182
2c	61.8	75.3	6.5	97.2	35.4	159
3a	83.6	96.8	12.0	127.3	53.0	185
3b	74.6	89.8	9.2	111.5	43.1	181
3c	54.4	68.4	5.5	87.3	29.0	146

Таблица 7. Контурные перемещения экрана (мм) для различных вариантов конфигурации створа (плотина высотой 200 м)

вариант	продольные		раскрытие		прогиб	
	русло	борт	русло	борт	русло	борт
1a	37	57	144	146	82	162
1b	20	61	118	126	79	157
1c	6	58	95	101	76	150
2a	38	65	138	143	82	182
2b (№0)	19	67	110	118	77	171
2c	6	56	80	87	76	163
3a	30	80	128	139	79	176
3b	15	73	101	111	74	166
3c	6	51	65	69	69	159

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoe sostoyaniye zhelezobetonnoy ekran kamennno-nasyppnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

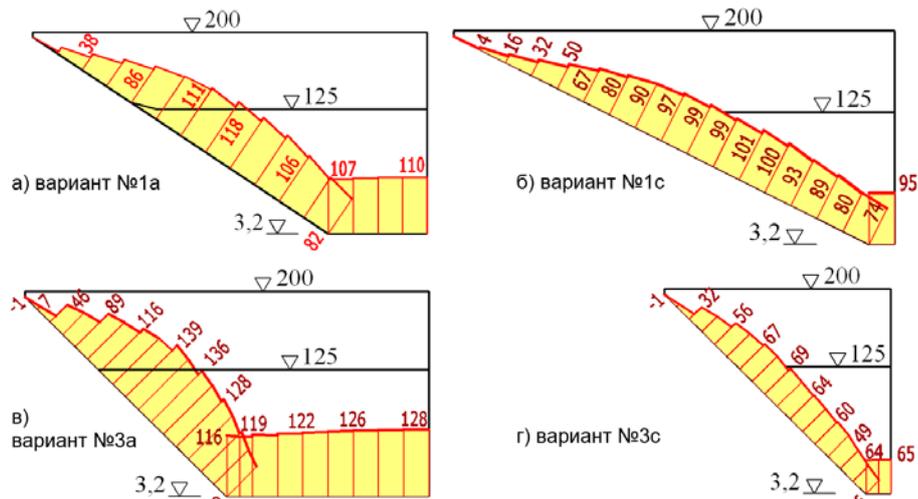


Рисунок 27. Раскрытия периметрального шва (мм) в створах разной конфигурации (плотина высотой 200 м)

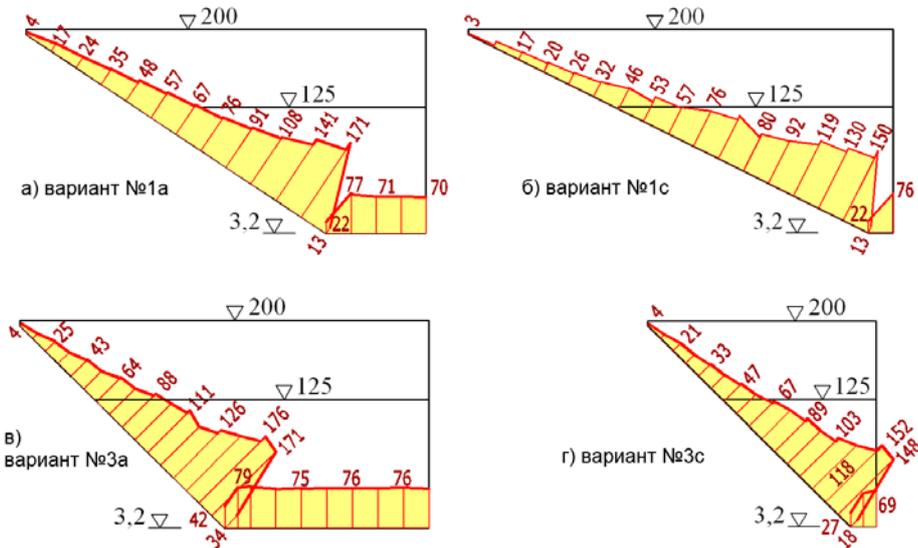


Рисунок 28. Контурные прогибы (мм) железобетонного экрана в периметральном шве для створов разной конфигурации (плотина высотой 200 м)

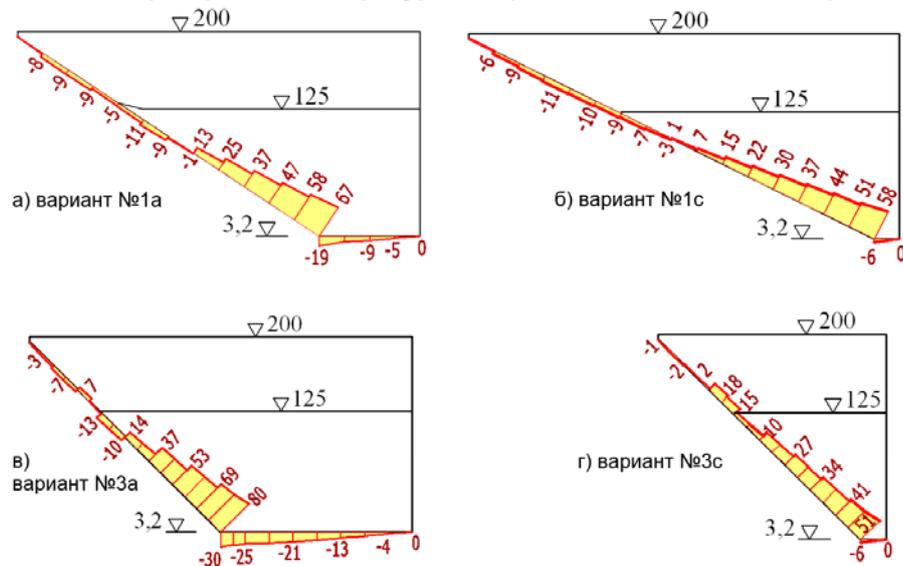


Рисунок 29. Подвижки железобетонного экрана в периметральном шве для створов разной конфигурации (плотина высотой 100 м)

Полученное напряженное состояние железобетонного экрана для различных вариантов створов показано на рисунках 30–33 в виде распределения в экране главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Для напряженного состояния экрана сверхвысокой плотины высотой 200 м характерны те же особенности, что и для плотины высотой 100 м – возникновение растягивающих напряжений  $\sigma_1$  в направлении вдоль откоса и сжатие в направлении от борта к борту (по напряжениям  $\sigma_3$ ).

Обращает на себя внимание тот факт, что при тех значительных перемещениях, которые испытывает экран, на напорной грани экрана не возникло растягивающих напряжений (рис. 30), превышающих расчетную прочность бетона на растяжение.

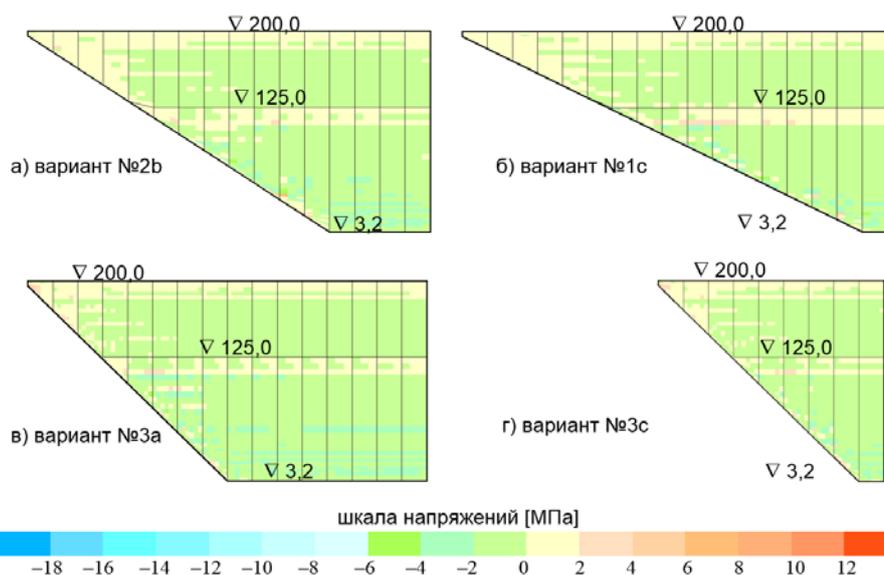
Зона значительных растягивающих напряжений  $\sigma_1$  наблюдается на низовой грани экрана, в области его примыкания к основанию, особенно на бортовом участке (рис. 31). Значения напряжений очень велики: на значительной площади они не превышают 6 МПа, а имеются зоны с напряжениями свыше 8 МПа. Такие растягивающие напряжения возникают как в широких, так и в узких створах. Конечно, такие растягивающие напряжения многократно превышают прочность бетона на растяжение и не смогут быть восприняты арматурой, трещинообразование неминуемо. Это говорит о том, что для обеспечения надежности железобетонного экрана в сверхвысоких плотинах необходимо сгладить изгибные деформации нижней части экрана, в зоне его примыкания к основанию.

Уровень сжимающих напряжений  $\sigma_3$  в сверхвысокой плотине также очень высок. Их максимум наблюдается в центре экрана, в верхней части первой очереди. В варианте №0 в этой зоне значения  $\sigma_3$  достигают 15.1 МПа на низовой грани (рис. 33а) и 14.4 МПа на верховой грани (рис. 32а). Эти напряжения примерно в 2 раза выше, чем в плотине высотой 100 м. Получен практический вывод: увеличение высоты плотины в 2 раза привело к увеличению ее перемещений в 3.5 раза, но напряжений – лишь в 2 раза.

Самые большие сжимающие напряжения  $\sigma_3$  в железобетонном экране получены в самом узком створе – в варианте №3с. На верховой грани они достигают 17.1 МПа (рис. 32г), а на низовой грани – 15.6 МПа (рис. 33г). При этом зона максимального сжатия по  $\sigma_3$  наблюдается практически по всей высоте оси симметрии железобетонного экрана.

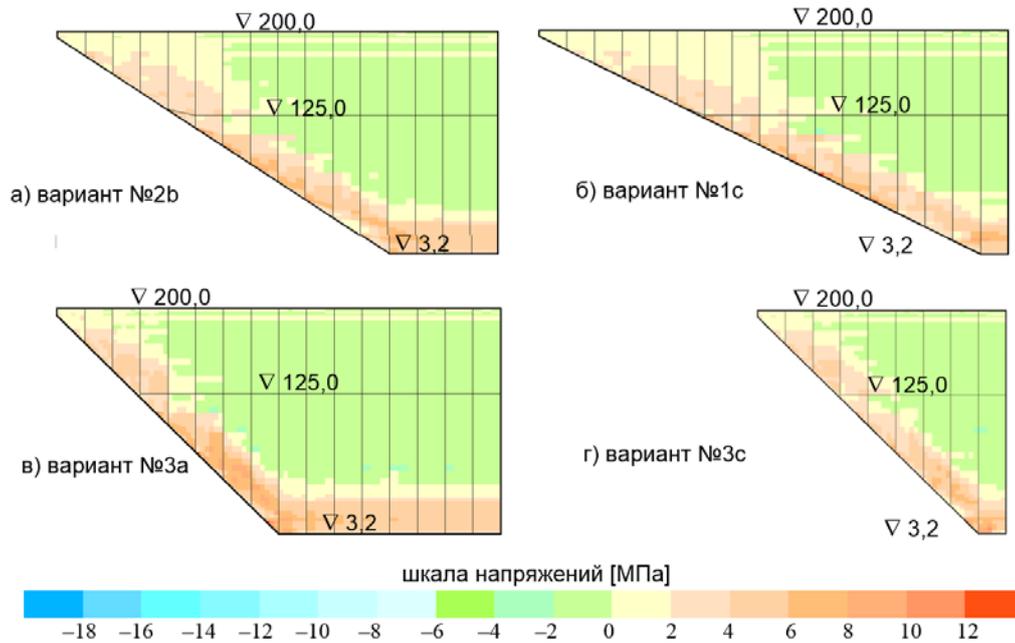
Полученные сжимающие напряжения  $\sigma_3$  в железобетонном экране (15...17 МПа) очень велики. Они сопоставимы с прочностью на сжатие бетона даже высоких классов. Учитывая, что железобетонный экран представляет собой тонкостенную конструкцию, разрушение экрана от сжатия представляется весьма вероятным. Это согласуется с данными натурных наблюдений за построенными сверхвысокими плотинами, в экране которых образовались вертикальные трещины от сжатия с разрушением защитного слоя арматуры.

По этой причине строительство плотин высотой более 300 м в настоящий момент невозможно.

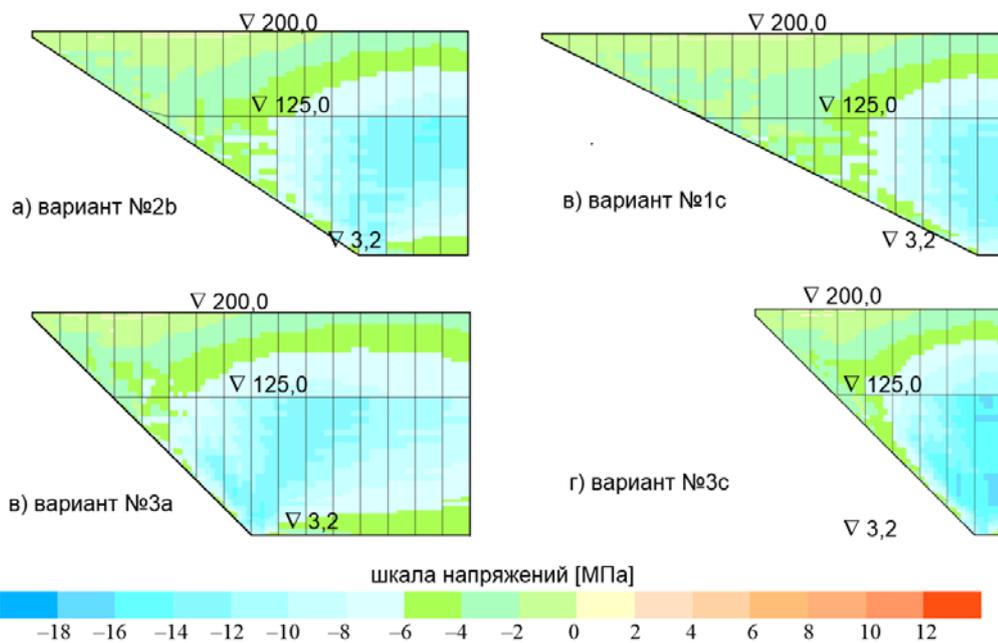


**Рисунок 30. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  на верховой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации**

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekran kamennno-nasyrnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)



**Рисунок 31. Максимальные главные напряжения  $\sigma_1$  на низовой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации**



**Рисунок 32. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на верховой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации**

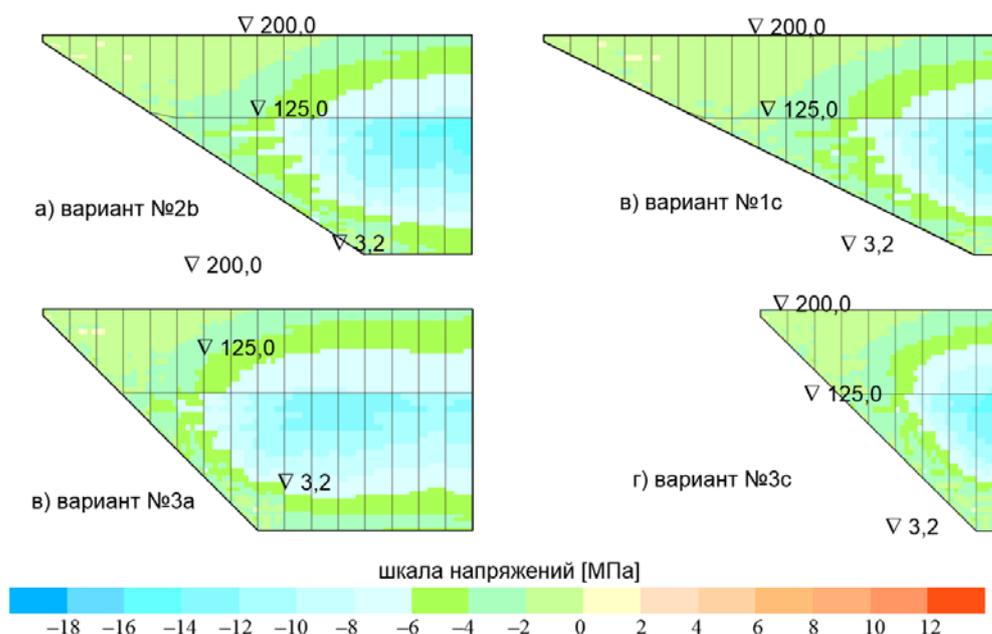


Рисунок 33. Минимальные главные напряжения  $\sigma_3$  на низовой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации

### Выводы

1. Численное моделирование пространственной работы каменно-насыпной плотины с железобетонным экраном в различных по форме и размерам скальных ущельях показало, что геометрия створа вносит мало качественных изменений в НДС экрана, но влияет на его количественные показатели. По нашему мнению, наибольшее влияние на формирование НДС железобетонного экрана имеет качество уплотнения каменной насыпи, так как оно определяет величины и характер его деформаций. Для принятой модели деформируемости каменной насыпи во всех рассмотренных вариантах в интервале высот плотины от 100 до 200 м НДС экрана имеет одинаковые особенности:

- экран испытывает изгиб в двух плоскостях, а также растягивающие усилия в направлении вдоль откоса;
- в результате растягивающих усилий периметральный шов в большинстве сечений раскрывается, что позволяет в некоторой степени компенсировать эти усилия;
- в периметральном шве происходят также сдвиговые перемещения как в виде контурных прогибов, так и в виде перемещений вдоль контура шва;
- на большей части площади экран находится в состоянии двухосного продольного сжатия, однако возможно и образование в экране растягивающих напряжений в тех зонах, где он испытывает интенсивные или сложные изгибные деформации, наиболее вероятны растягивающие напряжения в направлении вдоль откоса;
- наибольший изгиб испытывает экран в зоне примыкания к скальному основанию, этот изгиб вызывает появление на низовой грани экрана растягивающих напряжений ( $\sigma_1$ ), зона растяжения располагается широкой полосой параллельно контуру периметрального шва;
- в направлении от борта к борту экран в основном сжат (по  $\sigma_3$ ) за исключением самых дальних от русла бортовых секций.

Различие между вариантами конфигурации створа и высоты плотины заключается только в величинах, характеризующих эти проявления НДС.

2. Ширина русловой части створа имеет более значимое влияние на НДС железобетонного экрана, чем наклон скальных бортов. У плотины, расположенной в узком створе, осадки и смещения плотины меньше, чем у плотины, расположенной в широком створе. При этом ширина створа в большей степени влияет именно на смещения, а не на осадки. Это благоприятно сказывается на НДС экрана. В широких створах в нижней части экрана возможно образование горизонтальных трещин в результате растягивающих напряжений. С уменьшением ширины створа НДС экрана улучшается следующие характеристики:

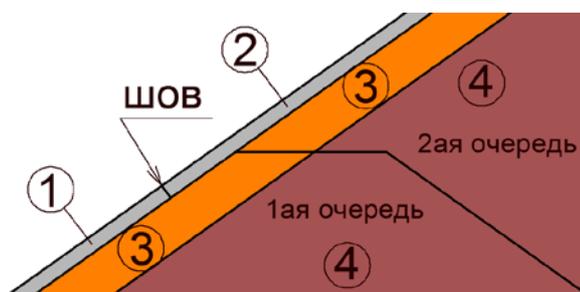
Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnoyego ekrana kamenno-nasyypnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

- уменьшаются прогибы экрана и его изгибные деформации по высоте;
- уменьшаются раскрытия и смещения в периметральном шве;
- экран переходит в состояние двухосного сжатия, уменьшается риск образования горизонтальных трещин.

Однако для плотин, расположенных в узких створах, характерно увеличение в экране сжимающих напряжений в направлении от борта к борту, что может привести к нарушению прочности бетона на сжатие и образованию вертикальных трещин.

3. Большое значение для формирования НДС железобетонного экрана имеет последовательность возведения плотины – наличие очередей строительства и очертания профиля плотины первой очереди. При строительстве плотины в несколько очередей НДС железобетонного экрана улучшается. Это происходит за счет уменьшения горизонтальных смещений в сторону нижнего бьефа и дополнительного сжатия экрана от осадок каменной насыпи под весом последующих очередей строительства. Для правильного прогнозирования надежности работы экрана расчеты НДС экрана необходимо вести только с учетом последовательности возведения и загрузки плотины.

При возведении плотины в несколько очередей следует учитывать, что на границе очередей экран может испытывать неблагоприятные локальные изгибные деформации из-за неравномерности протекания осадок каменной насыпи. Рекомендуется верхнюю часть экрана каждой очереди возводить только после завершения отсыпки следующей очереди, с устройством шва (рис. 34).



**Рисунок 34. Схема сопряжения железобетонного экрана первой и второй очередей строительства: 1 – экран первой очереди строительства; 2 – экран второй очереди строительства; 3 – подэкранный слой; 4 – упорные призмы плотины**

4. Наибольшую опасность для надежной работы экрана представляют изгибные деформации в зоне примыкания к скальному основанию, так как вследствие появления растягивающих напряжений они могут вызвать трещинообразование в экране. Поэтому необходимо предусматривать конструктивные меры по сглаживанию изгибных деформаций путем обеспечения большей свободы деформаций в узле примыкания к скальному основанию. Этого можно добиться укладкой в нижней части подэкранный зоны более податливого грунта (негрунтового материала). Является целесообразным и устройство шва параллельно периметральному.

5. Наибольшей опасности образования трещин подвергаются экраны сверхвысоких плотин (высотой от 150 м и выше). В них трещины могут возникнуть как от растягивающих, так и от сжимающих напряжений. По нашим исследованиям, увеличение высоты плотины в 2 раза сопровождается увеличением напряжений в экране также примерно в 2 раза.

Чтобы избежать трещинообразования, необходимо минимизировать деформации экрана, особенно в направлении из бьефа в бьеф. Для этого требуется очень качественное уплотнение грунтов тела плотины с целью снизить их деформируемость. Еще один путь уменьшения деформаций экрана – это регулирование его НДС путем выбора соответствующей последовательности ее загрузки. Необходимо, чтобы смещения экрана в сторону нижнего бьефа от гидростатического давления были частично компенсированы смещениями в сторону верхнего бьефа от бокового расширения каменной насыпи под собственным весом. Из этого следует, что сверхвысокие плотины с железобетонным экраном должны возводиться в несколько очередей.

6. Полученные нами результаты численного моделирования не могут рассматриваться как исчерпывающие, применимые для прогноза НДС любой плотины. В реальных условиях НДС

плотины и железобетонного экрана может быть совсем другим, так как оно определяется множеством факторов, разброс величин которых может быть очень значительным.

Первый, наиболее значимый фактор – это деформируемость каменной наброски и ее зонирование в теле плотины. Камень деформируется нелинейно, и его свойства сильно изменяются в зависимости от степени уплотнения. Опыт показывает, что осадки каменно-насыпных построенных плотин одинаковой высоты изменяются в очень широких пределах [21]. В теле плотины камень зонирован, и его деформируемость может различаться в 2 раза, например, как в плотине Num Ngun 2 (Лаос) [23]. Кроме того, возможны и локальные деформации экрана, связанные с анизотропией деформативных свойств или просадками каменной наброски. Соответственно, НДС экрана может изменяться очень существенно в зависимости от деформируемости каменной насыпи.

Второй фактор – это схема последовательности возведения и загрузки плотины. Третий фактор – это геометрия железобетонного экрана. Реальные плотины возводятся обычно в несимметричных створах сложной формы.

### Литература

### References

1. ICOLD, «Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction». International Commission on Large Dams. Bulletin 141. 2010.
2. Cooke J.B., Sherard J.L. In Proceedings of the 2nd Symposium on Concrete Face Rockfill Dams: Design, Construction, and Performance. Detroit, Mich., October 1985. American Society of Civil Engineers (ASCE). New York. Pp. 1–658.
3. Саинов М.П. Влияние деформируемости каменной насыпи на напряженно-деформированное состояние железобетонного экрана плотины // Вестник МГСУ, 2015. № 3. С. 69 - 78.
4. Саинов М.П. Исследование влияния формы створа на работу периметрального шва каменной плотины с железобетонным экраном // Вестник МГСУ, 2013. № 9. С. 101 - 117.
5. Саинов М.П. Работа железобетонного экрана каменной плотины в пространственных условиях по результатам численного моделирования // Приволжский научный журнал, 2015, № 3 (35), с. 25 - 31.
6. Маркес Фильо П., Пинто Н. де С. Характеристики каменно-набросных плотин с бетонным экраном, полученные опытным путем // Международный дайджест по гидроэнергетике и плотинам. 2007. с. 69-74.
7. Manoel S., Freitas Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. Inter // Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2009. Vol.3. Issue 9. Pp. 11-18.
8. Song W, Sun Y, Li L, Wang Y. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD // Journal of Hydroelectric Engineering. 2008. No 3(27). Pp.33–37.
9. Yifeng Chen, Ran Hu, Wenbo Lu, Dianqing Li, Chuangbing Zhou. Modeling coupled processes of non-steady seepage flow and non-linear deformation for a concrete-faced rockfill dam // Computers and Structures. 2011. No 89. Pp.1333 - 1351.
10. Mokhtar Pour E., Freitas Jr. M.S. Rehabilitation for high concrete faced rockfill dam (CFRD): Availability and vulnerability Dam Maintenance and Rehabilitation II. // Proceedings of the 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation. 2011. Pp. 881-887.
11. De Pinto N.L.S. Very high CFRDs: Behaviour and design features // International Journal on Hydropower and Dams. 2008. No 15(4). Pp. 43-49.
12. Pritchard S. CFRD under pressure // International Water Power and Dam Construction. 2008. No 60(2). Pp. 27-29.
1. ICOLD, «Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction». *International Commission on Large Dams*. Bulletin 141. 2010.
2. Cooke J.B., Sherard J.L. In *Proceedings of the 2nd Symposium on Concrete Face Rockfill Dams: Design, Construction, and Performance*. Detroit, Mich., October 1985. American Society of Civil Engineers (ASCE). New York. Pp. 1–658.
3. Sainov M.P. Vliyaniye deformiruyemosti kamennoy nasypi na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekrana plotiny [Influence of deformability of stone embankment on the stress-strain state of reinforced concrete dam screen]. *Vestnik MGSU*. 2015. No 3. Pp.69-78. (rus)
4. Sainov M.P. Issledovaniye vliyaniya formy stvora na rabotu perimetralnogo shva kamennoy plotiny s zhelezobetonnyim ekranom [Study of the influence of alignment work perimeter seam stone dam with reinforced concrete screen]. *Vestnik MGSU*. 2013. No 9. Pp.101-117. (rus)
5. Sainov M.P. Rabota zhelezobetonnoy ekrana kamennoy plotiny v prostranstvennykh usloviyakh po rezul'tatam chislennogo modelirovaniya [Work of reinforced concrete screen of stone dam in spatial terms as a result of numerical simulation]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2015. No 3(35). Pp. 25-31. (rus)
6. Marques Filo P., Pinto N. de S. Kharakteristiki kamennonabrosnykh plotin s betonnyim ekranom, poluchennyye opytным путем [Features of rockfill dam with a concrete screen obtained by experiment]. *Mezhdunarodnyy daydzhest po gidroenergetike i plotinam*. 2007. Pp.69-74. (rus)
7. Manoel S., Freitas Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. Inter. *Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2009. Vol.3. Issue 9. Pp. 11-18.
8. Song W, Sun Y, Li L, Wang Y. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 3(27). Pp.33–37.
9. Yifeng Chen, Ran Hu, Wenbo Lu, Dianqing Li, Chuangbing Zhou. Modeling coupled processes of non-steady seepage flow and non-linear deformation for a concrete-faced rockfill dam. *Computers and Structures*. 2011. No 89. Pp.1333 - 1351.
10. Mokhtar Pour E., Freitas Jr. M.S. Rehabilitation for high concrete faced rockfill dam (CFRD): Availability and vulnerability Dam Maintenance and Rehabilitation II. *Proceedings of the 2nd International Congress on Dam*

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoe sostoyaniye zhelezobetonnoy ekrana kamennonasyypnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

13. Song, W., Wang, P. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems // *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(4). Pp. 94-100.
14. Cheng S., Zhang G., Zhang J., Wan L. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam // *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(5). Pp. 53-58.
15. Dakoulas P., Thanopoulos Y., Anastassopoulos K. Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD // *International Journal on Hydropower and Dams*. 2008. No 15(2). Pp. 95-101.
16. Dang F.N., Yang C., Xue H.B., Fang J.Y. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD. // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014. No 45(4). Pp. 435-442.
17. Dang F.N., Wang X.W., Tian W., Xu S.J. Deformation and stress characteristics of high asymmetric CFRD and for measures // *Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering*. 2012. No 43(5). Pp. 602-608.
18. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. 9(4). С. 208-225.
19. Рассказов Л.Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // *Гидротехническое строительство*, 1997, № 7, с.31-36.
20. Саинов М.П. Параметры деформируемости крупнообломочных грунтов в теле грунтовых плотин [Электронный ресурс]. *Строительство: наука и образование*. 2014. Вып. 2. Ст. 2. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.
21. Park H.G., Kim Y.S., Seo M.W., Lim H.D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam // *Jour. of the KGS*. September 2005. Vol. 21. No. 7. Pp. 91-105.
22. Mairaing W., Thongthumachat C. Deformation Characteristics after Impounding of Nam Ngum 2 Concrete Face Rock Filled Dam (CFRD) in Laos PDR // *19th National Convention on Civil Engineering (Thailand)*. 2014. Pp.70-78
23. Khamwongkhong, P., Mairaing, W. Dam embankment deformation and face slab movement monitoring of Nam Ngum 2 concrete face Rockfill Dam. *Dams and Reservoirs under Changing Challenges - 79 Annual Meeting of ICOLD. Swiss Committee on Dams*. 2011. Pp. 79-90.
11. De Pinto N.L.S. Very high CFRDs: Behaviour and design features. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2008. No 15(4). Pp. 43-49.
12. Pritchard S. CFRD under pressure. *International Water Power and Dam Construction*. 2008. No 60(2). Pp. 27-29.
13. Song, W., Wang, P. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(4). Pp. 94-100.
14. Cheng S., Zhang G., Zhang J., Wan L. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(5). Pp. 53-58.
15. Dakoulas P., Thanopoulos Y., Anastassopoulos K. Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2008. No 15(2). Pp. 95-101.
16. Dang F.N., Yang C., Xue H.B., Fang J.Y. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014. No 45(4). Pp. 435-442.
17. Dang F.N., Wang X.W., Tian W., Xu S.J. Deformation and stress characteristics of high asymmetric CFRD and for measures. *Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering*. 2012. No 43(5). Pp. 602-608.
18. Sainov M.P. Vychislitel'naya programma po raschetu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh plotin: opyt sozdaniya, metodiki i algoritmy [The computer program for the calculation of stress-strain state of earth dams: experience of creation, techniques and algorithms]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. No. 9(4). Pp. 208-225. (rus)
19. Rasskazov L.N., Dzhkha Dzh. Deformiruyemost i prochnost grunta pri raschete vysokikh gruntovykh plotin [Deformability and strength of the soil in the calculation of the high embankment dams]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 1997. No 7. Pp. 31-36. (rus)
20. Sainov M.P. Parametry deformiruyemosti krupnooblomochnykh gruntov v tele gruntovykh plotin [Parameters deformability of coarse soils in the body of earth dams] [Elektronnyy resurs]. *Stroitelstvo: nauka i obrazovaniye*. 2014. Vol. 2. Issue 2. URL: <http://www.nso-journal.ru>. (rus)
21. Park H.G., Kim Y.S., Seo M.W., Lim H.D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam. *Jour. of the KGS*. September 2005. Vol. 21. No. 7. Pp. 91-105.
22. Mairaing W., Thongthumachat C. Deformation Characteristics after Impounding of Nam Ngum 2 Concrete Face Rock Filled Dam (CFRD) in Laos PDR. *19th National Convention on Civil Engineering (Thailand)*. 2014. Pp.70-78
23. Khamwongkhong, P., Mairaing, W. Dam embankment deformation and face slab movement monitoring of Nam Ngum 2 concrete face Rockfill Dam. *Dams and Reservoirs under Changing Challenges. Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges - 79 Annual Meeting of ICOLD. Swiss Committee on Dams*. 2011 Pp. 79-90.

Михаил Петрович Саинов,  
+7(926)6078931; эл. почта: [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru)

Mikhail Sainov,  
+7(926)6078931; [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru)

© Саинов М.П., 2016

doi: 10.5862/MCE.63.3

## Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя

### Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel

**Аспирант И.А. Рылова,**  
Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный  
университет, Москва, Россия

**I.A. Rylova,**  
National Research Moscow State University of Civil  
Engineering, Moscow, Russia

**Ключевые слова:** гладкий канал; вязкий подслой; буферная зона; распределение скоростей; интеграл вероятности

**Key words:** smooth channel; viscous sublayer; buffer zone; velocity distribution; error integral

**Аннотация.** С учетом экспериментальных данных по продольным и нормальным к стенке турбулентным пульсациям скорости и коэффициента корреляции между ними получено выражение для турбулентной и вязкой составляющих трения в пристенной зоне течения. На основе уточненного значения вязкой компоненты трения получена толщина слоя вязкого течения, которая оказалась зависящей от коэффициента гидравлического сопротивления. Рассмотрено нестационарное течение в зоне влияния вязких напряжений на основе модифицированной модели Эйнштейна и Ли, в которую введена изменяющаяся скорость на верхней границе вязкого слоя. С учетом этого условия получено решение динамического уравнения в виде профиля скорости, зависящего от времени и расстояния от твердой границы потока. Данное распределение скоростей справедливо для буферной зоны, в которой осуществляется переход от слоя вязкого течения к слою постоянного турбулентного напряжения. Для профилей скорости в слое постоянного турбулентного напряжения уточнены параметр Кармана и вторая константа турбулентности на основании данных измерений, выполненных в гладком канале с помощью лазерного измерителя скорости. Предложена модель перемежающегося течения в буферной зоне, согласно которой в разные моменты времени вязкое течение разрушается и заменяется турбулентным течением с логарифмическим распределением скоростей. Для расчета скорости течения в буферной зоне предложено использовать коэффициент перемежаемости, который учитывает время существования турбулентного течения, отнесенного к общему времени реализации процесса. Анализ показал, что коэффициент перемежаемости изменяется с расстоянием от твердой границы и количественно близок к интегралу вероятности. Распределение скоростей, полученное на основе предложенных подходов, подтверждается данными измерений ряда авторов.

**Abstract.** Taking into consideration the experimental data on the longitudinal and the normal to the wall velocity fluctuations and the correlation coefficient between the fluctuations, the turbulent and viscous friction components near the wall were determined. Based on the adjusted value of the components of viscous friction there was obtained thickness of the viscous flow, depending on the drag coefficient. The unsteady flow in the viscous sublayer based on Einstein and Lee's model modified by introducing the changing velocity at the upper boundary of the viscous sublayer was considered. The solution to the dynamic equation in the form of the velocity profile, depending on time and distance from the wall was obtained. This velocity profile may be used for the buffer region, in which a viscous flow is transformed into a turbulent one. Von-Karman's parameter and the profile constant were determined on the basis of LDA measurements in the smooth channel. According to the intermittent flow model for the buffer region, a viscous flow is destroyed and replaced with a turbulent flow with a logarithmic velocity profile. To determine velocity distribution in the buffer region it is proposed to use a gamma intermittency factor, allowing for time of the turbulent flow, divided by the total time of the process. The analysis shows

Rylova I.A. Utochnenie harakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

that the intermittency factor varies with the distance from the wall, and it is quantitatively similar to the error integral. The obtained velocity distribution has been confirmed by many authors' measurements.

### Введение

Уточненное распределение скоростей в пристенной зоне потока необходимо при решении задач прогнозирования кавитационной эрозии водосбросных сооружений [1, 2], турбинного и насосного оборудования, при обтекании потоком местных сопротивлений [3]. Характеристики течения в пристенной зоне потока также играют важную роль при расчете теплового баланса зданий и сооружений [4], решении задач теплопереноса в атомной и тепловой энергетике [5], ракетной и авиационной технике, при рассмотрении вопросов взвешивания и транспорта наносов в каналах и реках [6–8]. Последние исследования показали, что в пристенной зоне потока вязкий подслой нарастает во времени, разрушается и сменяется турбулентным течением [9–20]. Объектом исследования являются турбулентные течения в широких открытых каналах и пограничных слоях без градиента давления.

Обычно при рассмотрении распределения скоростей в непосредственной близости от твердой границы считается, что течение определяется действием сил вязкого трения. Эта область потока называется вязким подслоем, безразмерная толщина которого имеет порядок  $\frac{u_* z}{\nu} = (5 \div 11,5)$ . Для расчета распределения скоростей в этой зоне обычно используется закон внутреннего трения Ньютона [21], на основе которого получается линейное распределение скоростей в вязком подслое:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu}, \quad (1)$$

где  $u$  – местная скорость в точке  $z$ ;

$z$  – расстояние от дна канала или стенки трубы;

$\nu$  – кинематическая вязкость;

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \text{ – динамическая скорость,}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$$\tau_0 = \text{const} = \rho u_*^2 \text{ – полное трение на стенке.}$$

Как отмечалось выше, течение в вязком подслое является нестационарным [9–20]: в отдельные периоды времени течение вблизи твердой границы имеет чисто вязкий характер – в другие в той же точке наблюдения течение жидкости приобретает турбулентный характер. Эти особенности течения влияют на процесс переноса количества движения и импульса силы трения в пределах подслоя и буферной зоны. Попытки расчета течения в нестационарном вязком подслое при отличающихся граничных условиях были предприняты рядом авторов [9, 11, 14]. Первая попытка расчета нестационарного течения в вязком подслое была предпринята Х. Эйнштейном и Х. Ли [9] в предположении нарастания толщины вязкого подслоя в течение некоторого времени с последующим мгновенным разрушением вязкого подслоя и возникновением турбулентного течения в момент разрушения подслоя. Для расчета вязкого течения использовано уравнение Навье – Стокса, записанное для плоского равномерного течения [22], которое для условия горизонтального дна приводится к виду:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где  $t$  – время нарастания вязкого подслоя;

$u_x$  – продольная составляющая скорости.

Это уравнение имеет вид уравнения теплопроводности, стандартное решение которого записывается в виде интеграла вероятности (интеграл ошибок):

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 40–52.

$$u = \frac{2 \cdot u_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^H e^{-n^2} dn, \quad (3)$$

где предел интегрирования  $H$  имеет вид  $H = \frac{z}{2 \cdot \sqrt{vt}}$ ;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-n^2} dn$  – интеграл вероятности (интеграл ошибок);

$n$  – аргумент подынтегральной функции;

$u_0 = \text{const}$  – скорость за пределами вязкого подслоя.

Полученное упрощенное уравнение (2) не содержит факторов, инициирующих движение, поскольку согласно граничным условиям в начальный момент времени  $t=0$  движение уже существует и его скорость во всех точках  $z$  равна  $u_0$ . Таким образом, уравнение (3) описывает изменение скорости течения на различном расстоянии  $z$  от стенки, в различные моменты времени  $t$ . Учитывая сделанные упрощающие допущения, решение (3) следует считать приближенным.

Интегрирование уравнения (2) с учетом изменения скорости  $u_0$  на внешней границе вязкого подслоя с ростом его толщины приобретает значительные математические трудности. В работе [11] получено решение упрощенного уравнения (2) методом интегральных преобразований Лапласа, при котором период роста вязкого подслоя разбивался на малые интервалы, в пределах которых скорость  $u_0$  можно было считать постоянной, но изменяющейся от интервала к интервалу. Это позволяло использовать для каждого интервала времени полученное решение в виде:

$$\frac{u}{u_*} = 5,75 \cdot \lg 335 \sqrt{\frac{t_c}{t_0}} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{u_* \cdot z}{27,5 \cdot \nu} \right) \cdot \sqrt{\frac{t_0}{t_c}} - \operatorname{erf} \left( 3,5 - \frac{u_* \cdot z}{27,5 \cdot \nu} \sqrt{\frac{t_0}{t_c}} \right) \right], \quad (4)$$

где  $t_c$  – период роста вязкого подслоя;

$t_0$  – доля  $t_c$ , в пределах которой скорость  $u_0$  на внешней границе считается мало изменяющейся и определяется по стандартному логарифмическому профилю [23], при толщине вязкого подслоя  $z_{vi}$ , соответствующей рассматриваемому времени  $t_{0i}$ .

Попытка усовершенствования модели Эйнштейна и Ли была предпринята в работе Ю.В. Брянской [14], в которой рассмотрено перемежающееся вязко-турбулентное течение в каждой точке по толщине вязкого подслоя. Скорость на верхней границе вязкого подслоя считалась изменяющейся и определялась по стандартному логарифмическому профилю:

$$\left( \frac{u}{u_*} \right)_t = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* z}{\nu} + C, \quad (5)$$

где  $u$  – осредненная по времени скорость турбулентного течения в точке потока.

Выражение (5) получено при  $\tau = \text{const}$  с использованием ряда недостаточно обоснованных гипотез, при этом средние значения  $\kappa$  и  $C$ , определенные И. Никурадзе опытным путем для потоков в гладких границах, оказались равными  $\kappa = 0,4$  и  $C = 5,5$ . Однако более поздние исследования обнаружили непостоянство этих параметров [24–26], что требует их дальнейшего изучения.

В работе [14] определение коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  с использованием полученного профиля (4) для зоны переходного сопротивления обнаружили расхождение с экспериментальными данными по  $\lambda$ . Для устранения этого расхождения возникла необходимость введения дополнительно времени действия турбулентного течения, которое частично заменяет вязкое течение в рассматриваемой точке.

Результаты, полученные различными авторами [9, 11, 14], основываются на недостаточно обоснованных допущениях и ограниченных экспериментальных данных, что требует дальнейших аналитических и экспериментальных исследований пристенного турбулентного течения в широких каналах и пограничных слоях, которые обладают качественной схожестью.

### Исследования и анализ

Распределение скоростей (1) при вязком течении у стенки является приближенным в связи с тем, что касательные напряжения линейно изменяются по глубине потока. С учетом этого можно записать динамическое уравнение в следующем виде:

$$\rho u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \mu \frac{du}{dz}, \quad (6)$$

где  $h$  – глубина потока;

$\mu = \rho \nu$  – динамическая вязкость.

Разделяя переменные и интегрируя выражение (6), получаем более точное линейно-параболическое распределение скоростей в вязком подслое:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{z}{h}\right) \quad (7)$$

Полученное выражение (7) показывает, что в пристенном слое при  $\frac{z}{h} \approx 0,1$  учет изменения полного напряжения трения дает поправку в скорости вязкого течения, не выходящую за пределы 5 %.

Многочисленные измерения [27–31] показывают, что в слоях потока практически вплоть до самой стенки обнаруживается пульсационное движение жидкости как в продольном, так и в вертикальном направлении по нормали к стенке. Это указывает на действие в потоке механизма обмена количеством движения, имеющего в отдельные моменты времени турбулентную природу вплоть до самой стенки. Таким образом, устоявшееся мнение о том, что вязкое трение вблизи твердой границы потока соответствует полному напряжению трения, является неточным.

Для определения доли вязкой компоненты трения выделим из суммарного трения турбулентную составляющую трения  $\tau_t$ , для расчета которой используем известное выражение для коэффициента взаимной корреляции между пульсациями продольной и вертикальной

компонент вектора скорости  $R_{xz} = \frac{\overline{u'_x \cdot u'_z}}{\sqrt{\overline{u_x'^2}} \cdot \sqrt{\overline{u_z'^2}}}$ .

Числитель этого выражения согласно Лоренцу [32] связан с турбулентным трением следующим соотношением:

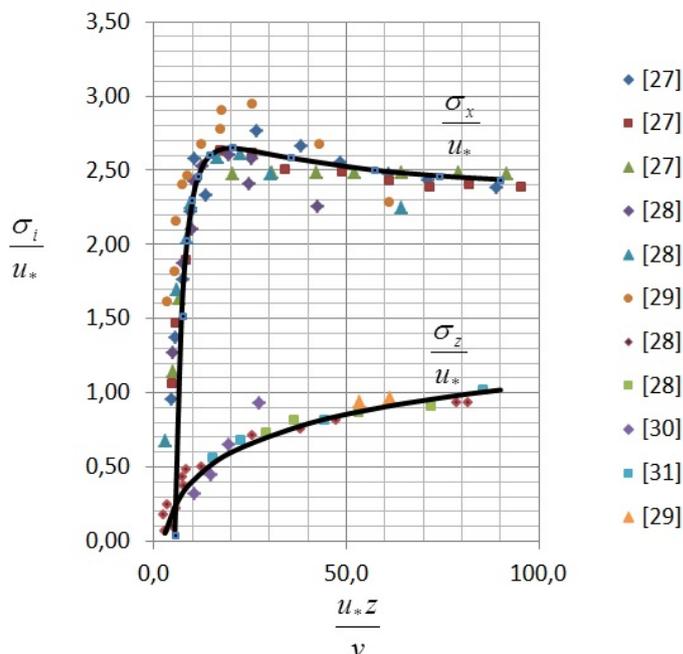
$$\tau_t = \rho \cdot \overline{u'_x \cdot u'_z} \quad (8)$$

Знаменатель этого выражения представляет собой произведение стандартов (среднеквадратичных величин) продольной и вертикальной пульсаций скорости. С учетом этого можно записать:

$$\tau_t / \rho = R_{xz} \cdot \sqrt{\overline{u_x'^2}} \cdot \sqrt{\overline{u_z'^2}} \quad (8)$$

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 40–52.

Стандарты продольной и вертикальной пульсационных составляющих скорости были найдены аппроксимацией данных многочисленных измерений [31] в пристеночной зоне, приведенных на рисунке 1.



**Рисунок 1. Распределение стандартов продольных  $\frac{\sigma_x}{u_*}$  и вертикальных  $\frac{\sigma_z}{u_*}$  пульсаций скорости вблизи стенки, нормированных динамической скоростью, по данным измерений [31] в пограничном слое на пластине и в каналах**

Аппроксимационные зависимости для продольной и поперечной пульсаций скорости для  $5,5 \leq \frac{u_* z}{\nu} \leq 100$  подобраны методом наименьших квадратов в виде:

$$\frac{\sigma_x}{u_*} = \frac{\sqrt{u_x'^2}}{u_*} = \frac{2,3 \cdot \left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2 + 14 \cdot \frac{u_* z}{\nu} - 140}{\left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2} \tag{10}$$

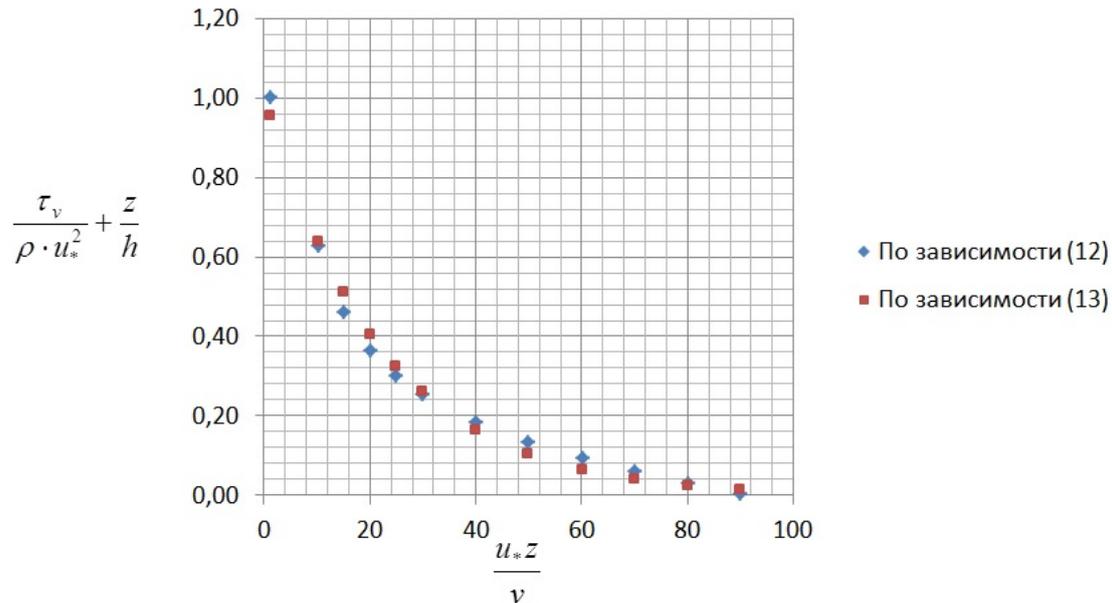
$$\frac{\sigma_z}{u_*} = \frac{\sqrt{u_z'^2}}{u_*} = 0,28 \cdot \ln \frac{u_* z}{\nu} - 0,24 \tag{11}$$

Данные измерений показывают, что коэффициент корреляции  $R_{xz}$  в пристенной зоне течения изменяется слабо и близок к 0.4 [31]. Согласно некоторым измерениям имеется тенденция к уменьшению  $R_{xz}$  с приближением к стенке, однако учет этого требует специального исследования; в настоящей работе коэффициент  $R_{xz}$  принимался равным 0.4.

С учетом найденной таким образом турбулентной компоненты касательного напряжения вязкая составляющая полного трения записывается в виде:

$$\tau_v = \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(1 - \frac{z}{h}\right) - 0,4 \cdot \rho \cdot \frac{\left(2,3 \cdot \left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2 + 14 \cdot \frac{u_* z}{\nu} - 140\right)}{\left(\frac{u_* z}{\nu}\right)^2} \cdot u_* \cdot \left(0,28 \cdot \ln \frac{u_* z}{\nu} - 0,24\right) \cdot u_* \quad (12)$$

С использованием выражения (12) вязкая составляющая трения в непосредственной близости к границе  $5,5 \leq \frac{u_* z}{\nu} \leq 100$  в периоды вязкого течения представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. Распределение вязкой составляющей трения вблизи твердой границы потока**

Расчетные данные (см. рис. 2) показывают, что вязкие напряжения трения остаются заметными до  $\frac{u_* z}{\nu} \approx 90$ . Полученные данные были аппроксимированы следующей более простой зависимостью:

$$\frac{\tau_v}{\rho \cdot u_*^2} + \frac{z}{h} = \exp^{-0,045 \cdot \frac{u_* z}{\nu}} \quad (13)$$

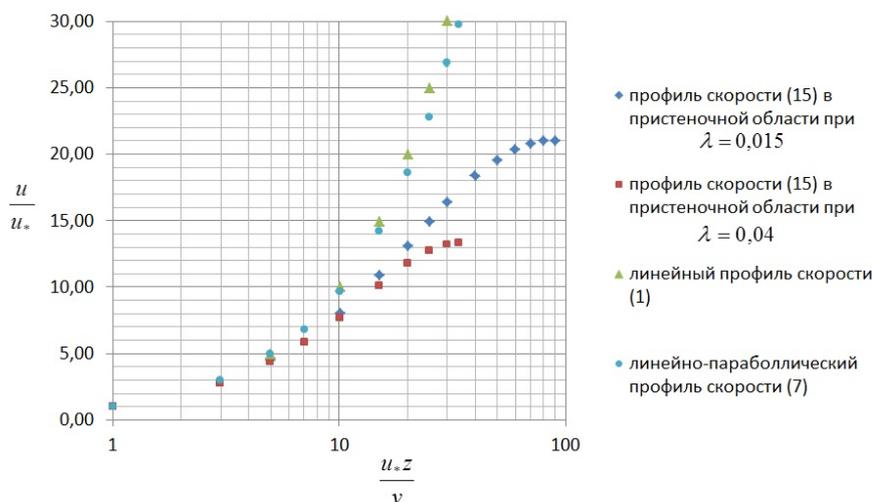
Приравнявая  $\tau_v$  из (13) к вязкому напряжению Ньютона [21], запишем:

$$\rho \cdot u_*^2 \cdot \left( \exp^{-0,045 \cdot \frac{u_* z}{\nu}} - \frac{z}{h} \right) = \mu \frac{du}{dz} \quad (14)$$

Интегрируя выражение (14), получаем профиль скорости в зоне влияния вязких напряжений, найденных с учетом изменения полного касательного напряжения по глубине потока:

$$\left( \frac{u}{u_*} \right)_v = 22,2 \cdot \left( 1 - \exp^{-0,045 \cdot \frac{u_* z}{\nu}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{u_* z}{\nu} \cdot \frac{z}{h} \quad (15)$$

Расчетные распределения скоростей в вязком пристеночном течении при различных коэффициентах гидравлического сопротивления представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3. Профили скорости (1), (7) и (15) при коэффициентах гидродинамического сопротивления 0.015 и 0.04**

Сопоставление полученного «вязкого» профиля (15) с известным линейным (1), а также линейно-параболическим распределением скоростей (7) показывает, что в периоды вязкого течения, рассчитанные скорости (15) заметно меньше тех, которые определяются как по линейному, так и по линейно-параболическому профилю скорости.

Полученные выражения для вязкой компоненты трения позволяют также определить безразмерную толщину слоя  $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$ , в котором проявляется действие вязкой компоненты трения

(при  $z \rightarrow l_{p1}$  вязкая составляющая напряжения  $\tau_v \rightarrow 0$ ). Величина  $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$ , найденная из условия  $\tau_v = 0$ , приводится к виду:

$$\frac{u_* l_{p1}}{\nu} = \frac{1,35}{\lambda} - 10 \tag{16}$$

Полученное выражение показывает, что безразмерная толщина слоя, в пределах которого проявляется действие вязких напряжений, зависит от коэффициента гидравлического сопротивления, и в диапазоне реальных значений  $\lambda$  от 0.015 до 0.04 (в котором обычно работают гладкие водоводы) изменяется  $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$  от 35 до 90, что близко к безразмерной толщине буферной зоны [33].

Учитывая определенную сложность использования полученного ранее решения (4) для буферной зоны предлагается феноменологическая модель перемежающегося течения, согласно которой в каждой точке  $\frac{u_*z}{\nu}$  этой зоны развивающееся вязкое течение сменяется течением турбулентным. Вводится понятие коэффициента перемежаемости  $\gamma$  как отношение времени действия турбулентного течения к общему времени цикла развития и разрушения вязкого подслоя.

С учетом этого скорость течения в буферной зоне можно представить как осредненную величину вязкого и турбулентного течений с учетом времени их действия:

$$\left( \frac{u}{u_*} \right) = \left( \frac{u}{u_*} \right)_v \cdot (1 - \gamma) + \left( \frac{u}{u_*} \right)_t \cdot \gamma, \tag{17}$$

Rylova I.A. Utochnenie karakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

где  $\left(\frac{u}{u_*}\right)_v$  – вязкая составляющая профиля скорости, определенная по зависимости (15);

$\left(\frac{u}{u_*}\right)_t$  – турбулентная составляющая профиля скорости, полученная по стандартному

логарифмическому профилю с реальными значениями параметра Кармана  $K$  и  $C$ ;

$\gamma = \frac{t_t}{T}$  – коэффициент перемежаемости, характеризующий суммарное время существования

турбулентного течения  $t_t$ , отнесенное к периоду наблюдения  $T$ .

Согласно предлагаемой модели перемежающегося течения скорость течения в любой точке буферной зоны находится осреднением двух состояний вязкого и турбулентного с учетом времени (вероятности) их действия. С приближением к стенке время (вероятность) вязкого состояния возрастает, с удалением от стенки возрастает вероятность (время) турбулентного состояния течения.

Перемежающееся вязко-турбулентное течение в пределах буферной зоны распространяется на максимальное расстояние от стенки, равное  $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$ . Если считать перемежающийся процесс изменения скорости в буферной зоне Гауссовским, максимальное расстояние принимается равным утроенному стандарту:

$$\frac{u_* l_{p1}}{\nu} = 3\sigma \quad (18)$$

Очевидно, что с увеличением расстояния от стенки вклад в профиль скорости вязкой составляющей уменьшается и второе слагаемое в выражении (17) приближается к единице. Сравнивая решение (3) с полученным выражением (17) вблизи верхней границы буферной зоны  $u = u_t \cdot \gamma$  при  $u_0 = u_t$ , находим, что  $\gamma \approx \text{erf}(x) = \Phi(x\sqrt{2})$ , связанный с интегралом вероятности Гаусса  $\Phi(x)$ , который табулирован [34]:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (19)$$

где  $t$  – текущее значение аргумента  $x$ ;

$x$  – предел интегрирования для рассматриваемой точки, который определялся как:

$$x = \frac{u_* z}{\nu} / \sigma \quad (20)$$

Для Гауссовского процесса значение  $\Phi(x) = 0$  при  $x = 0$  и  $\Phi(x) \approx 1$  при  $x = 3$ .

В моменты разрушения вязкого течения массы жидкости из вышележащих слоев, движущихся турбулентно, могут проникать вплоть до твердой границы [19–20], при этом скорость

этих масс  $\left(\frac{u}{u_*}\right)_t$ , входящая в выражение (17), может быть найдена по логарифмическому профилю Л. Прандтля [35].

### Основные результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, параметры  $K$  и  $C$  логарифмического профиля скорости (5) не являются постоянными. Для их анализа использовались опытные данные разных авторов, а также измерения профилей скорости, выполненные с использованием ЛДИС (лазерный доплеровский измеритель скорости) в прямоугольном безнапорном гладком канале НИУ МГСУ шириной 31 см при различных уклонах ( $i = 0,00046 \div 0,007$ ) и наполнениях ( $h = 1,3 \div 7,6$  см) в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = \frac{4 \cdot V \cdot h}{\nu} = (20500 \div 485000)$ . Измерения показали, что параметры  $K$  и  $C$  непостоянны и обнаруживают зависимость от коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$ .

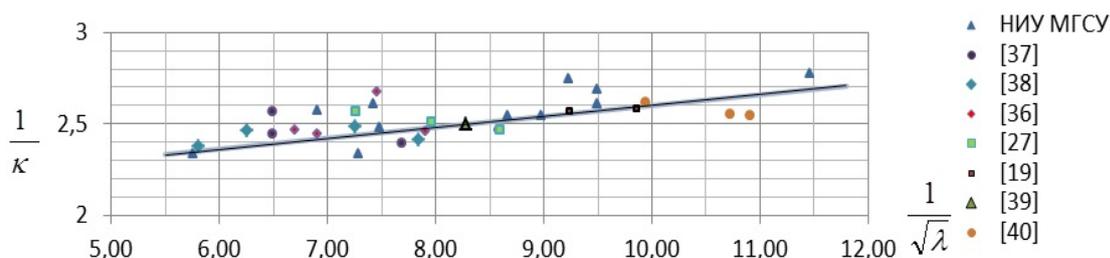


Рисунок 4. График изменения параметра Кармана  $K$  в зависимости от коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  по экспериментальным данным НИУ МГСУ, [19], [27], [36–40] в гладких каналах и пограничных слоях

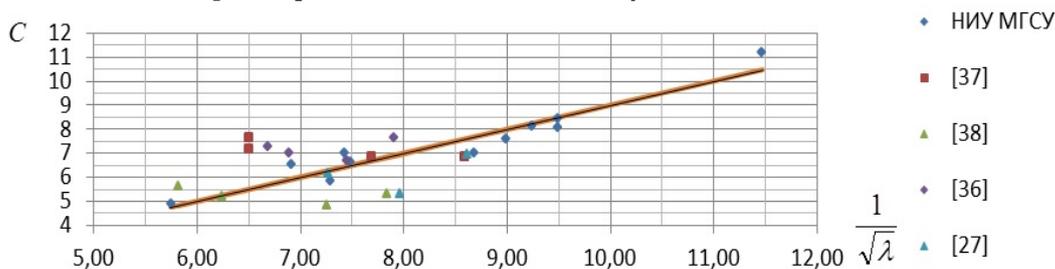


Рисунок 5. График изменения параметра  $C$  в зависимости от коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  по экспериментальным данным НИУ МГСУ и [27], [36–38] в гладких каналах

На основе экспериментальных данных получены следующие аппроксимационные зависимости для  $K$  и  $C$  при турбулентном течении в гладких широких каналах:

$$\frac{1}{K} = \frac{0,06}{\sqrt{\lambda}} + 2 \tag{21}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} - 1 \tag{22}$$

Использование полученных данных по распределению скоростей в непосредственной близости от стенки и логарифмического профиля скорости за пределами буферной зоны, а также доказанной адекватности между коэффициентом перемежаемости  $\mathcal{U}$  и интегралом вероятности позволили рассчитать распределение скоростей в буферной зоне для различных значений коэффициента сопротивления  $\lambda$ .

Проверочные расчеты производились для условий опытов Лауфера [36], Конт-Белло [27], Хабахпашевой [41] и измерений, выполненных в гладком канале МГСУ. Порядок расчета для гладких каналов был следующим.

Rylova I.A. Utochnenie karakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyzkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

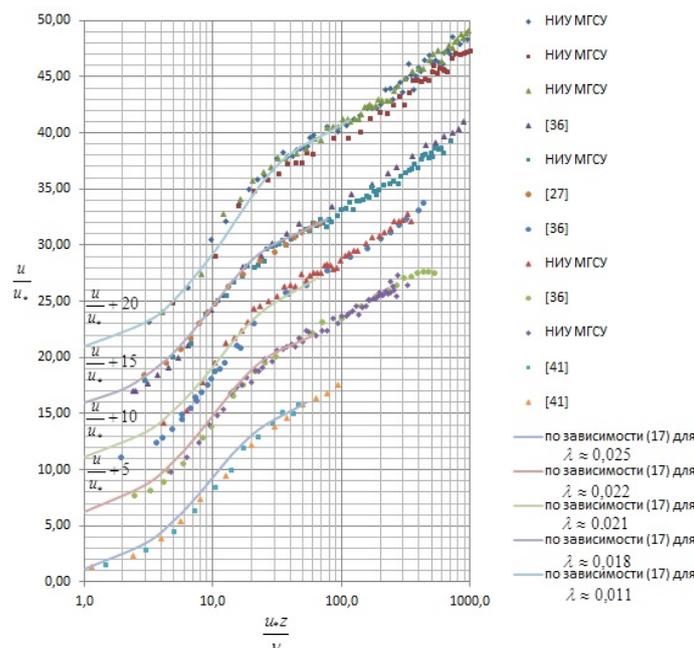
При известных размерах поперечного сечения канала в зоне стабилизированного течения по измеренному профилю скорости определялась средняя профильная скорость течения  $V$ . Динамическая скорость  $u_*$  находилась по линейной части измеренного профиля в непосредственной близости от дна. По известному соотношению между динамической и средней скоростью находилась коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$ . Динамическое число Рейнольдса, записанное в виде  $\frac{u_* h}{\nu}$ , использовалось для пересчета безразмерного соотношения  $\frac{u_* z}{\nu}$  в координату  $\frac{z}{h}$  там, где это было необходимо. Верхняя граница буферной зоны  $\frac{u_* l_{p1}}{\nu}$  определялась по зависимости (16). Для обрабатываемых данных значения  $K$  и  $C$  принимались равными опытными значениям, найденным по измерениям в пределах слоя Прандтля, толщина которого оказалась близкой к толщине вытеснения пограничного слоя [42]:

$$\frac{l_{p2}}{h} = \frac{1,35\sqrt{\lambda}}{1 + 1,35\sqrt{\lambda}} \quad (23)$$

Коэффициент перемежаемости определялся по предложенной методике через интеграл вероятности (19), аргумент которого  $x$  принимался равным (20), при этом предполагалось, что  $\sigma = \frac{1}{3} \frac{u_* l_{p1}}{\nu}$ . Значение скорости в пределах буферной зоны находилось по зависимости (17) с использованием профилей (5) и (15) и найденного значения  $\gamma = \Phi(x)$  для каждого значения  $x$ .

Результаты сравнения расчетных и опытных данных для буферной зоны течения приведены на рисунке 6.

Сопоставление результатов расчета по разработанной методике как в слое вязкого течения, так и в буферной зоне обнаруживают хорошую сходимость расчетных данных с результатами измерений автора и других авторитетных исследователей.



**Рисунок 6. Сопоставление экспериментальных данных, выполненных в гладком канале НИУ МГСУ, а также [27], [36], [41] с расчетными данными по зависимости (17)**

## Заклучение

1. По данным разных авторов получены аппроксимационные зависимости, описывающие изменения стандартов продольных и вертикальных пульсаций скорости в пристенной зоне широких гладких каналов, нормированные динамической скоростью.

2. С использованием выражения для коэффициента взаимной корреляции продольной и вертикальной компоненты пульсационной скорости и найденных аппроксимаций для стандартов  $\sqrt{u_x'^2}$  и  $\sqrt{u_z'^2}$  получены турбулентная и вязкая составляющие трения в пристеночной зоне течения.

3. Определена толщина слоя, в пределах которого вязкая составляющая трения отлична от нуля.

4. Обработкой данных выполненных измерений определены значения параметров  $K$  и  $C$  для профилей скорости в гладких каналах.

5. Разработана модель перемежающегося течения и методика расчета распределения скоростей в буферной зоне с учетом уточненного профиля скорости в периоды вязкого течения и реальных значений  $K$  и  $C$  в логарифмическом профиле скорости, использование которой дает результаты расчета, согласующиеся с данными измерений в гладких каналах.

### Литература

### References

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Воробьев Г.А. Защита гидротехнических сооружений от кавитации. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.</li> <li>2. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие / под ред. А.Б. Векслера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.</li> <li>3. Киселев П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости. М.: Энергия, 1980. 360 с.</li> <li>4. Петриченко М.Р., Харьков Н.С., Немова Д.В. Гидравлическая версия модели Буссинеска свободноконвективного движения в вертикальных щелях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 4(207). С. 26-39.</li> <li>5. Гиргидов А.Д. Гидравлика. Механика. Энергетика: избранные труды/ А.Д. Гиргидов. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 458 с.</li> <li>6. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 214 с.</li> <li>7. Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 238 с.</li> <li>8. Боровков В.С., Остякова А.В. Сальтационное движение частиц в потоке малой мутности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2005. № 39. С. 33-37.</li> <li>9. Einstein H.A., Li H. The viscous sublayer along a smooth boundary // Proc. Am. Soc. Civil Engrs. Paper. 1956. Vol. 82. paper No.945</li> <li>10. Schubauer G.B., Klebanoff P.S. Contribution on the mechanics of boundary layer transition // NACA Rep. 1289. 1956. Pp. 853-863.</li> <li>11. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.</li> <li>12. Emmons H.W., Bryson A. E. The laminar-turbulent transition in a boundary layer // Part I: JAS. 1951. No.18. Pp. 490-498; Part II: Proc. First US National Congress Appl. Mech. 1952. Pp. 859-868.</li> <li>13. Dryden H.L. Recent investigation of the problem of transition // ZFW. 1956. No.4. Pp. 89-95.</li> <li>14. Боровков В.С., Брянская Ю.В. Расчет сопротивления в переходной области с учетом перемежаемости течения в вязком подслое // Гидротехническое строительство. 2001. №7. С. 20-22.</li> <li>15. Hutchins N., Marusic I. Evidence of very long meandering</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vorobyev G.A. <i>Zashchita gidrotekhnicheskikh sooruzheniy ot kavitatsii</i> [Protection from cavitation damage of hydraulic structures]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 248 p. (rus)</li> <li>2. <i>Gidravlicheskiye raschety vodosbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy</i>. [Calculations spillways and hydraulic structures]. Spravochnoe posobie / pod red. A.B. Vekslera. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 624 p. (rus)</li> <li>3. Kiselev P.G. <i>Gidravlika. Osnovy mekhaniki zhidkosti</i> [Hydraulics. Foundation of fluid mechanics.] Moscow: Energiya, 1980. 360 p. (rus)</li> <li>4. Petrichenko M.R., Kharkov N.S., Nemova D.V. <i>Gidravlicheskaya versiya modeli Bussineska svobodno-konvektivnogo dvizheniya v vertikalnykh shchelyakh</i> [Hydraulic version of the Boussinesq model of free convective motion in vertical slits]. <i>Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU</i>. 2014. No. 4(207). Pp. 26-39. (rus)</li> <li>5. Girgidov A.D. <i>Gidravlika. Mekhanika. Energetika: izbrannyye trudy</i> [Hydraulics. Mechanics. Energy: Selected Papers]. Sankt-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2014. 458 p. (rus)</li> <li>6. Rossinskij K.I., Debol'skij V.K. <i>Rechnye nanosy</i> [River sediments]. Moscow: Science, 1980. 214 p. (rus)</li> <li>7. Fidman B.A. <i>Turbulentnost vodnykh potokov</i> [Turbulence of water flows]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 238 p. (rus)</li> <li>8. Borovkov V.S., Ostyakova A.V. <i>Saltatsionnoye dvizheniye chastiits v potoke maloy mutnosti</i> [Saltation of solid particles in flows of low turbidity]. <i>Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU</i>. 2005. № 39. Pp. 33-37. (rus)</li> <li>9. Einstein H.A., Li H. The viscous sublayer along a smooth boundary. <i>Proc. Am. Soc. Civil Engrs. Paper</i>. 1956. vol. 82. paper No. 945.</li> <li>10. Schubauer G.B., Klebanoff P.S. Contribution on the mechanics of boundary layer transition. <i>NACA Rep. 1289</i>. 1956. Pp. 853-863.</li> <li>11. Bogomolov A.I., Borovkov V.S., Mayranovskiy F.G. <i>Vysokoskorostnyye potoki so svobodnoy poverkhnostyu</i> [Highspeedy flows with free surface]. Moscow: Build. Publ. 1979. 344 p. (rus)</li> <li>12. Emmons H.W., Bryson A. E. The laminar-turbulent transition in a boundary layer. Part I: JAS. 1951. No.18. Pp. 490-498; Part II: <i>Proc. First US National Congress Appl. Mech.</i> 1952. Pp. 859-868.</li> </ol> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Rylova I.A. Utochnenie harakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchetom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

- features in the logarithmic region of turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2007. vol. 579. Pp. 1–28.
16. Mikhailov M.D., Freire A. P. S. Feasible domain of Walker's unsteady wall-layer model for the velocity profile in turbulent flows // *Annals of the Brazilian Academy of Sciences.* 2014. No. 86 (4). Pp. 2121-2135.
  17. Mazzuoli M., Vittori G., Blondeaux P. Turbulent spots in a Stokes boundary layer // *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. vol. 318 (032032). Pp. 1-10.
  18. Chauhan K., Philip J., de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. The turbulent/non-turbulent interface and entrainment in a boundary layer // *J. Fluid Mech.* 2014. vol. 742. Pp. 119-151.
  19. de Silva C. M., Gnanamanickam E. P., Atkinson C., Buchmann N. A., Hutchins N., Soria J., Marusic I. High spatial range velocity measurements in a high Reynolds number turbulent boundary layer // *Physics of fluids.* 2014. No.26 (025117). Pp.1-19.
  20. de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. Uniform momentum zones in turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2016. vol. 786. Pp. 309-331.
  21. Ньютон И. Математические начала натуральной философии/ Перевод с латинского и примечания А.Н. Крылова. М.: Наука, 1989. 688 с.
  22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
  23. Nikuradse I. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Stroemung in glatten Rohren // *Forschungs-heft (Forschungs auf dem Gebiete des Ingenieur-wesens).* 1932. No. 356. Pp.1-36.
  24. Buschmann M.H., Gad-el-Hak M. Turbulent boundary layers: reality and myth. // *IJCSM.* 2007. vol. 1. Issue 2-4. Pp. 159-176.
  25. Knopp T., Schanz D., Schröder A., Dumitra M., Cierpka C., Hain R., Kähler C.J. Experimental investigation of the log-law for an adverse pressure gradient turbulent boundary layer flow at  $Re_\theta = 10000$ . // *Flow, Turbulence and Combustion.* 2014. Vol. 92. Pp. 451-471.
  26. George W.K. Is there a universal log law for turbulent wall-bounded flows? // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2007. No. 365. Pp.789-806.
  27. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками/ Пер. с франц. М.: Мир, 1968. 174 с.
  28. Laufer, J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow // *NACA Rep.* 1174. 1954. P. 1-18
  29. Klebanoff P. S. Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient // *NACA Rep.* 1247. 1955. Pp. 1-19.
  30. Хабахпашева Е.М. Некоторые данные о структуре течения в вязком подслое// Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1974. С. 223-235.
  31. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П., Сабелев Г.И., Таранов Г.С. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. Москва: Атомиздат, 1978. 296 с.
  32. Карман Т. Некоторые вопросы теории турбулентности// Проблемы турбулентности. М-Л.: Изд-во ОНТИ НКТП, 1936. С. 35-74.
  33. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
  34. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. Изд.9. М.: Гос. Изд. Физико-математической литературы, 1962. 608 с.
  35. Прандтль Л. Результаты работ последнего времени по изучению турбулентности // Проблемы турбулентности. М-Л.: Изд-во ОНТИ НКТП, 1936. С. 9-35.
  36. Laufer J. Investigation of turbulent flow in a two-dimensional
  13. Dryden H.L. Recent investigation of the problem of transition. *ZFW.* 1956. No.4. Pp. 89-95.
  14. Borovkov V.S., Bryanskaya Yu.V. Raschet soprotivleniya v perekhodnoy oblasti s uchetom peremezhayemosti techeniya v vyazkom podslome podslome [Transitional Resistance Calculation in the Transitional Zone with Account for the Flow Intermittency inside the Viscous Sublayer]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo.* 2001. No 7. Pp. 20-22. (rus)
  15. Hutchins N., Marusic I. Evidence of very long meandering features in the logarithmic region of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2007. vol. 579. Pp. 1–28.
  16. Mikhailov M.D., Freire A. P. S. Feasible domain of Walker's unsteady wall-layer model for the velocity profile in turbulent flows. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences.* 2014. No. 86 (4). Pp. 2121-2135.
  17. Mazzuoli M., Vittori G., Blondeaux P. Turbulent spots in a Stokes boundary layer. *Journal of Physics: Conference Series.* 2011. vol. 318 (032032). Pp. 1-10.
  18. Chauhan K., Philip J., de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. The turbulent/non-turbulent interface and entrainment in a boundary layer. *J. Fluid Mech.* 2014. vol. 742. Pp. 119-151.
  19. de Silva C. M., Gnanamanickam E. P., Atkinson C., Buchmann N. A., Hutchins N., Soria J., Marusic I. High spatial range velocity measurements in a high Reynolds number turbulent boundary layer. *Physics of fluids.* 2014. No.26 (025117). Pp.1-19.
  20. de Silva Ch. M., Hutchins N., Marusic I. Uniform momentum zones in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2016. vol. 786. Pp. 309-331.
  21. Nyuton I. *Matematicheskiye nachala naturalnoy filosofii* [Mathematical Principles of Natural Philosophy. Translated from the Latin and notes AN Krylov.] Moscow: Science, 1989. 688 p. (rus)
  22. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. Moscow: Science, 1987. 840 p. (rus)
  23. Nikuradse I. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Stroemung in glatten Rohren. *Forschungs-heft (Forschungs auf dem Gebiete des Ingenieur-wesens).* 1932. No. 356. Pp.1-36.
  24. Buschmann M.H., Gad-el-Hak M. Turbulent boundary layers: reality and myth. *IJCSM.* 2007. vol. 1. Issue 2-4. Pp. 159-176.
  25. Knopp T., Schanz D., Schröder A., Dumitra M., Cierpka C., Hain R., Kähler C.J. Experimental investigation of the log-law for an adverse pressure gradient turbulent boundary layer flow at  $Re_\theta = 10000$ . *Flow, Turbulence and Combustion.* 2014. Vol. 92. Pp. 451-471.
  26. George W.K. Is there a universal log law for turbulent wall-bounded flows? *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2007. No. 365. Pp.789-806.
  27. Kont-Bello Zh. *Turbulentnoye techeniye v kanale s parallelnymi stenkami* [Turbulent flow in a channel with parallel walls]. Moscow: Mir, 1968. 174 p. (rus)
  28. Laufer, J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. *NACA Rep.* 1174. 1954. Pp. 1-18
  29. Klebanoff P. S. Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient. *NACA Rep.* 1247. 1955. Pp. 1-19.
  30. Khabakhpasheva Ye.M. Nekotoryye dannyye o strukture techeniya v vyazkom podslomepodslome [Some data on the structure of the flow in the viscous sublayer]. *Problemy teplofiziki i fizicheskoy gidrodinamiki.* Novosibirsk: Izd-vo SO AN SSSR, 1974. Pp. 223-235. (rus)
  31. Ibragimov M.Kh., Subbotin V.I., Bobkov V.P., Sabelev G.I., Taranov G.S. *Struktura turbulentnogo potoka i mekhanizm teploobmena v kanalakh* [Structure of turbulent flow and mechanism of heat exchange in channels]. Moscow: Atomizdat, 1978. 296 p. (rus)

Рылова И.А. Уточнение характеристик турбулентного пристеночного течения в гладком канале с учетом нестационарности вязкого подслоя // *Инженерно-строительный журнал.* 2016. № 3(63). С. 40–52.

- channel // NACA Rep. 1053. 1951. Pp. 1-20.
37. Wei T., Schmidt R., McMurtry P. Comment on the Clauser chart method for determining the friction velocity // *Experiments in Fluids*. 2005. No. 38: Pp. 695–699.
  38. Rona, A., Monti, M., Airiau, C. On the generation of the mean velocity profile for turbulent boundary layers with pressure gradient under equilibrium conditions // *The Aeronautical Journal*. 2012. Vol. 116. No. 1180.
  39. Harun Z., Monty J.P., Mathis R., Marusic I. Pressure gradient effects on the large-scale structure of turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 715. Pp. 477-498.
  40. Marusic I., Monty J.P., Hultmark M., Smits A.J. On the logarithmic region in wall turbulence // *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 716, R3. Pp. 1-11.
  41. Кутателадзе С.С., Миронов Б.П., Накоряков В.Е., Хабахпашева Е.М. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений. Новосибирск: Наука, 1975. 166 с.
  42. Боровков В.С., Волшаник В.В., Рылова И.А. Характерные особенности распределения скоростей в турбулентном потоке // *Вестник МГСУ*. 2015. №6. С.103-109.
  32. Karman T. Nekotoryye voprosy teorii turbulentnosti // *Problemy turbulentnosti*. M-L.: Izd-vo ONTI NKTP, 1936. Pp. 35-74. (rus)
  33. Shlikhting G. Teoriya pogranchnogo sloya. M.: Nauka, 1969. 742 p. (rus)
  34. Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya VTUZov. Izd.9* [Handbook of mathematics for engineers and technical colleges students]. Moscow: Gos. Izd. Fiziko-matematicheskoy literatury, 1962. 608 p. (rus)
  35. Prandtl L. Rezultaty robot poslednego vremeni po izucheniyu turbulentnosti [The results of recent work on the study of turbulence] // *Problemy turbulentnosti* [Problems of turbulence] Publ. Moscow-Leningrad: ONTI NKTP, 1936. Pp. 9-35. (rus)
  36. Laufer J. Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel. *NACA Rep. 1053*. 1951. Pp. 1-20.
  37. Wei T., Schmidt R., McMurtry P. Comment on the Clauser chart method for determining the friction velocity. *Experiments in Fluids*. 2005. No. 38. Pp. 695–699.
  38. Rona, A., Monti, M., Airiau, C. On the generation of the mean velocity profile for turbulent boundary layers with pressure gradient under equilibrium conditions. *The Aeronautical Journal*. 2012. Vol. 116. No. 1180.
  39. Harun Z., Monty J.P., Mathis R., Marusic I. Pressure gradient effects on the large-scale structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 715. Pp. 477-498.
  40. Marusic I., Monty J.P., Hultmark M., Smits A.J. On the logarithmic region in wall turbulence. *J. Fluid Mech.* 2013. vol. 716, R3. Pp. 1-11.
  41. Kutateladze S.S., Mironov B.P., Nakoryakov V.Ye., Khabakhpasheva Ye.M. *Eksperimentalnoye issledovaniye pristennykh turbulentnykh techeniy* [Experimental investigation of near-wall turbulent flows]. Novosibirsk: Science. 1975. 166 p. (rus)
  42. Borovkov V.S., Volshaniк V.V., Rylova I.A. *Kharakternyye osobennosti raspredeleniya skorostey v turbulentnom potoke* [Features of the velocity distribution in a turbulent flow]. *Vestnik MGSU*. 2015. No 6. Pp.103-109. (rus)

Ирина Александровна Рылова,  
+7(926)2215937; эл. почта:  
mariposa516@yandex.ru

Irina Rylova,  
+7(926)2215937; mariposa516@yandex.ru

© Рылова И.А., 2016

Rylova I.A. Utochnenie harakteristik turbulentnogo pristenochnogo techeniya v gladkom kanale s uchedom nestacionarnosti vyazkogo podsloya [Detailed characteristics of the near-wall flow containing unsteady viscous sublayer in smooth channel]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 40–52. doi: 10.5862/MCE.63.3 (rus)

doi: 10.5862/MCE.63.4

## Surrogate modeling for initial rotational stiffness of welded tubular joints

### Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений

*M.R. Garifullin,  
A.V. Barabash,  
E.A. Naumova,  
O.V. Zhuvak,*

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University, St. Petersburg, Russia*

*T. Jokinen,  
M. Heinisuo,*

*Tampere University of Technology, Tampere,  
Finland*

*Аспирант М.Р. Гарифуллин,  
студент А.В. Барабаш,  
студент Е.А. Наумова,  
студент О.В. Жувак,*

*Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, Санкт-  
Петербург, Россия*

*Научный сотрудник Т. Йокинен,  
PhD, профессор М. Хейнисуо,*

*Технологический университет Тампере,  
Тампере, Финляндия*

**Key words:** surrogate modeling; kriging; square hollow section; plane bending; finite element analysis

**Ключевые слова:** суррогатное моделирование; кригинг; квадратный полый профиль; плоскость изгиба; анализ методом конечных элементов

**Abstract.** Recently, buildings and structures erected in Russia and abroad have to comply with stringent economic requirements. Buildings should not only be reliable and safe, have a beautiful architectural design, but also meet the criteria of rationality and energy efficiency. In practice, this usually means the need for additional comparative analysis in order to determine the optimal solution to the engineering task. Usually such an analysis is time-consuming and requires huge computational efforts. In this regard, surrogate modeling can be an effective tool for solving such problems. This article provides a brief description of surrogate models and the basic techniques of their construction, describes the construction process of a surrogate model to calculate initial rotational stiffness of welded RHS joints made of high strength steel (HSS).

**Аннотация.** В последнее время сильно возросли экономические требования, предъявляемые к зданиям и сооружениям, возводимым в России и за границей. Здания должны быть не только надежными и безопасными, иметь красивый внешний вид, но также удовлетворять критериям рациональности и энергоэффективности. На практике это означает необходимость дополнительного сравнительного анализа для определения оптимального решения инженерной задачи. Обычно такой анализ трудоемок и требует огромных вычислительных затрат. В связи с этим суррогатное моделирование может быть эффективным инструментом для решения таких проблем. В данной статье приводится краткое описание суррогатных моделей и основных методов их построения, описывается процесс строительства суррогатной модели для расчета начальной жесткости вращения сварных соединений квадратного полого профиля из высокопрочной стали.

### Introduction

Tubular structures with welded joints are used in a wide range of structural applications. The most typical application is tubular truss. The structural analysis model is frequently constructed using beam finite elements, and the braces are connected to the chords using hinges. Actually, a welded joint does not behave as a hinge when it is loaded by a moment. The joint has resistance against the moment, but in the joint area deformations may occur both at the brace and at the chord, so the stiffness against the moment has to be taken into account in the global analysis of the structure. In [1] only the moment

Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 53–76.

resistance is given for the joint where the angle between the brace and the chord is 90 degrees. In [2] there is the equation, which can be used to calculate the initial rotational stiffness for the same case, angle 90 degrees.

When aiming to economic and environmental friendly design stiffness of the joints must be taken into account. This is especially true when using high strength steel in structures, because then buckling at the ultimate limit state and deflections and vibrations in the serviceability limit state are often critical. Besides, the impact of the installation process and operation of the construction on its strength properties should be considered [3–8]. In [9] and [10] it has been shown that the rotational stiffness of the welded tubular joint is the main parameter when considering buckling of members of tubular trusses.

In the design it is possible to define the rotational stiffness for the joint using comprehensive finite element analysis (FEA). In practice, this is impossible, especially when performing optimization of structures when the structural analysis must be done thousands of times. In order to avoid computationally heavy calculations, surrogate models (or meta models) have been developed. The surrogate model is the basis of a new direction in the simulation engineering. It is a mathematical method of drawing up a model based on the test results and/or computational experiments carried out with a variety of objects of the class in question [11]. Surrogate models have been used widely in aerospace [12–16], civil engineering [17]. Methods of using surrogate models for optimizing steel structures are described in [19–27]. The optimum design of steel frames is presented using semi-rigid joints and surrogate models [18]. This article shows construction of the surrogate model in the case of initial rotational stiffness of welded tubular structures.

This article describes the construction process of a surrogate model for calculating initial rotational stiffness of welded RHS joints made of high strength steel (HSS). Only joints with butt welds are considered. This assumption was made to simplify the surrogate and finite element modeling. The effect of fillet welds is considered in [28].

## Theoretical background

### Surrogate model construction

In the surrogate model construction, we replace the computationally expensive function  $f(x)$  with a sum of two other functions, where  $(x)$  is the vector of the variables [16]), which has the same dimension of input and output parameters as the original function [29, 30]:

$$f(x) = s(x) + \varepsilon(x), \quad (1)$$

where  $s(x)$  is the surrogate model at the point  $x$  and  $\varepsilon(x)$  is the difference between the two.

The idea is to use the function  $s(x)$  during calculations or optimization instead of the function  $f(x)$ . The function  $s(x)$  is chosen so that it should be cheap to evaluate, and hereby the computation time can be reduced considerably.

We can start with a quadratic regression model:

$$s_p(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

or with linear regression ( $\beta_{ij} = 0$ ) or with the constant, only  $\beta_0 \neq 0$ . If this gives good results (see later criteria), we can add to the regression a *predictor*  $Z(x)$  (stochastic process) and end up to Kriging.

Kriging is the most popular method for creating surrogate models. In [31-48] it was made well-known in the context of modeling, and optimization of deterministic functions, respectively.

The Kriging models consist of two components. The first component is some simple model that captures the trend in the data, and the second component measures deviation between the simple model and the true function. An example of the surrogate model  $\bar{f}(x)$  using Kriging with one variable  $x$  with  $n$  sample points is:

$$\bar{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j + Z(x), \quad (3)$$

where the zero order regression is used and the predicted value  $\bar{f}(x)$  is given scaled to [0;1].

The real values  $f(x)$  can be calculated from the normalized data  $\bar{f}(x)$ . In the construction of  $Z(x)$  we need a *correlation function* between points. Define  $R$  as the matrix  $R$  of stochastic-process correlations between the sample points  $x_i$  and  $x_j$ :

$$R_{ij} = R(\theta, x_i, x_j), \quad i, j, = 1, \dots, n \quad (4)$$

and let  $\bar{r}(x)$  be a vector of correlation between sample points and untried points  $x$ :

$$\bar{r}(x) = [R(\theta, x_1, x) \dots R(\theta, x_n, x)]^T \quad (5)$$

The mostly preferred correlation function is the Gaussian correlation:

$$R(x_i, x_j) = \exp \left[ - \sum_{k=1}^m \theta_k \left| x_i^k - x_j^k \right|^2 \right], \quad (6)$$

where  $\theta_k$  are unknown correlation parameters,  $k = 1, \dots, m$ ;  
 $m$  is the number of design variables;

$x_i^k$  and  $x_j^k$  are the components of samples  $x_i$  and  $x_j$ .

After this the surrogate model can be defined, see e.g. [16].

The article [29] indicates the main problems which arise in the construction of surrogate models and their optimization. For instance, the task of reducing the dimension [49], the task of building a multidimensional nonlinear approximating dependencies problem of clustering and classifying data.

The surrogate model can be used with data of both low and high accuracy. These data of low accuracy can be obtained by the analytical method and the data of high accuracy - during the "field" test [50].

The obtained approximate dependence is necessary not only to predict the result, but also to determine the accuracy of the calculation [51]. One of the basic principles to ensure greater accuracy of calculations in constructing the surrogate model is the removal of a set of superfluous or redundant parameters [52]. In particular, the task of reducing the dimension [53] not only greatly simplifies the calculations, but also allows the surrogate model to meet the required conditions [54]. In addition, the method of reducing the dimension of predicates (of explanatory parameters) is practiced [55].

For certain areas, where it is necessary to build a model, which gives the most accurate information, it is necessary to build several approximating dependencies. Thus, the final approximation procedure will include a classifier that determines which private approximator needs to be taken for the given input variable [30].

Some special cases of surrogate model construction are also considered in [56–61].

### *Surrogate model validation*

The validation process uses a new sample size approximately equal to one third of the sample size used to build the surrogate model [62]. The validation process consists of comparing the results of the surrogate model with those of the real response. This is a specific problem which depends on the accuracy required of the fitted model. If this accuracy is too low, the surrogate model must be modified by the introduction of more sample points or by the modification of the surrogate model variables.

The validation process consists of testing a new set of sample points, but excluding the original sample point set. The accuracy of the surrogate model can be checked using  $R^2$  value [18]. No single rule exists that specifies a minimum  $R^2$  value which guarantees a good fitting surrogate model. In [18]

only the surrogate models with  $R^2$  values larger than 0.85 are considered. We realized that  $R^2$  was not proper in our case; all our models had  $R^2 \geq 0.95$ , so we had to refuse to consider it.

For validation we applied the relative error, Eq. (0.1). Usually, the optimization procedure for tubular trusses requires no more than 10% average relative error, so it is accepted as our main criterion.

$$Error = \frac{|C_{FEM} - C_{SURR}|}{C_{FEM}} \quad (7)$$

### Design of Experiment

The method for determining the sample points to carry out an analysis is called the Design of Experiments (DOE). The location of the sample points is very important for generating an accurate surrogate model. It consists of a compromise between the usage of a reasonable number of sample points to build an accurate model. Several DOE methods are described in [63–65]. The Latin Hypercube Sampling (LHS) proposed by [63] is the most popular space filling sampling technique. In this research engineering justification is used to define the sample points.

### Variables

At the first step of sampling the list of variables should be determined. Every Y joint can be described completely by the following variables (Fig. 1): chord dimensions  $b_0$ ,  $t_0$ ; brace dimensions  $b_1$ ,  $t_1$ ; angle  $\varphi$  between the brace and the chord; material properties  $f_{y0}$ ,  $f_{y1}$ .

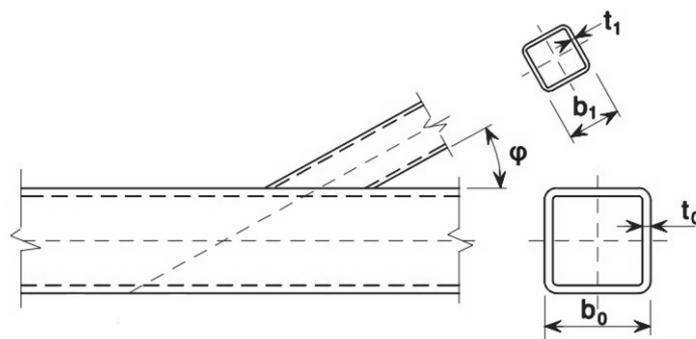


Figure 1. Dimensions of Y joint

The number of variables has a strong effect on the process of surrogate modeling: the lesser the number of variables is, the easier it is to create a reasonable surrogate model, so it was reasonable to reduce the number of variables.

First of all, we realized that the influence of  $t_1$  on rotational stiffness was rather weak and excluded it from the surrogate modeling. Besides, in this research we considered joints with only butt welds. In the case of butt welds material properties have no effect on the initial rotational stiffness of joints, so we also excluded  $f_{y0}$  and  $f_{y1}$  from the list of variables.

We also replaced  $b_1$  with its relative analogy  $\beta = b_1/b_0$  so that this variable had similar values for all chords. It should be noted that due to low values of  $\beta$ , compared to other variables, it was important to input  $\beta$  with at least four characters after the decimal point to avoid the loss of precision.

After all, we presented the function of the initial rotational stiffness as a function of four variables:

$$C = f(b_0, t_0, \beta, \varphi) \quad (8)$$

### Sampling

At the next step sample points should be determined. The sample points should be defined so that:

- they cover the whole range of our interest;
- they meet requirements of building codes
- the failure of the brace is not critical.

We considered cold-formed tubes with discrete sizes followed those of Ruukki. Only square sections (SHS) were considered. Our goal was to predict typical practical cases with the chord sizes  $b_0$  between 100x100x4 and 300x300x12.5. We considered HSS up to S700 and this also limited the range of cross-sections.

In this research the Eurocodes were used for joints [1] and extension for steel grades up to S700 [66]. The main requirement restricted the range of sections:  $0.25 \leq \beta \leq 0.85$ .

The ratio  $b_1/t_1$  was limited by  $b_1/t_1 \leq 35$  and to cross-section class 1 or 2. The ratio  $b_0/t_0$  was limited by  $10 \leq b_0/t_0 \leq 35$  and, moreover, to the cross-section class 1 or 2.

The angle  $\varphi$  between the brace and the chord is due to welding in the range of  $30 \text{ degrees} \leq \varphi \leq 90 \text{ degrees}$ .

Moreover, we chose the sample points in such a way that for every variable there were 3 different values (minimum, middle and maximum), while others remained constant. Exceptions were made only for cases with the maximum  $t_0$  and  $\beta$ , because they had complicated modeling in Abaqus. For those cases only two values (minimum and middle) of  $t_0$  were considered.

Fig. 2 presents the distribution of sample points in respect to chord dimensions. Black crosses are the possible sections of Ruukki catalogue; blue points are the chosen sample points. Eurocode limits are marked with green lines. Similarly, Fig. 3 presents the relative distributions of sample points in respect to brace dimensions.

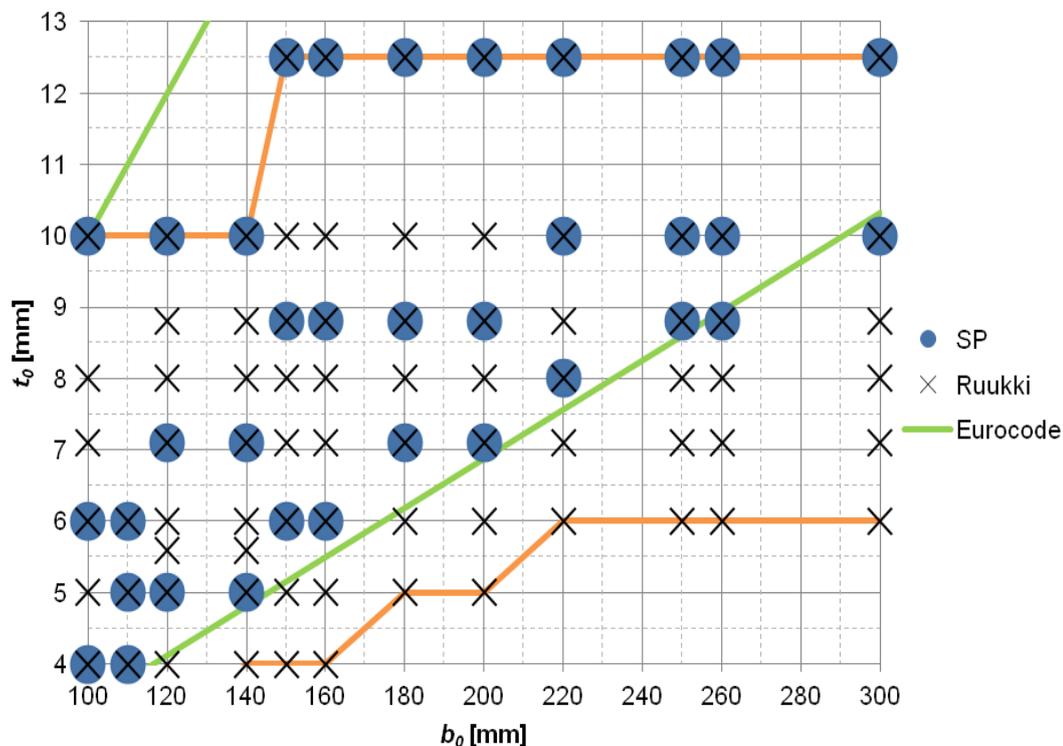


Figure 2. Sample points:  $b_0$ - $t_0$

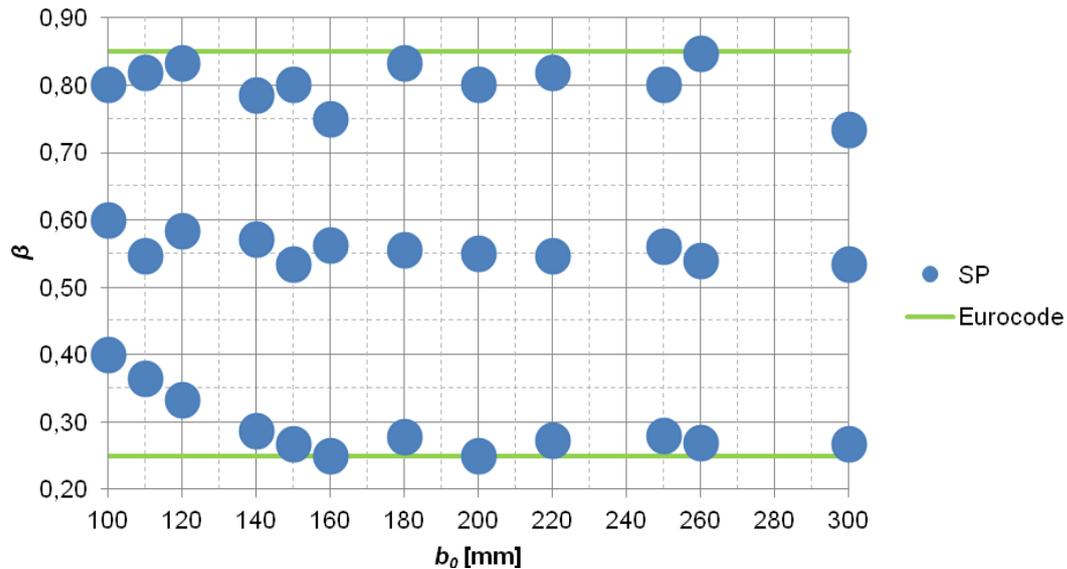


Figure 3. Sample points:  $\beta$ - $b_0$

As a whole, we chose 285 sample points. To calculate the values of their initial rotational stiffness, the comprehensive FEA was exploited.

#### Finite element analysis

To calculate values of rotational stiffness in sample points, we conducted the Finite Element Analysis (FEA) in Abaqus. The model was made using C3D8 brick elements. All sections were modeled with round corners, according to [67]. Two-layered mesh was created with solid hexahedral elements, being refined near the joints, as shown in Fig. 4. The butt welds were modeled as “no weld” by using TIE constraints (Fig. 4).

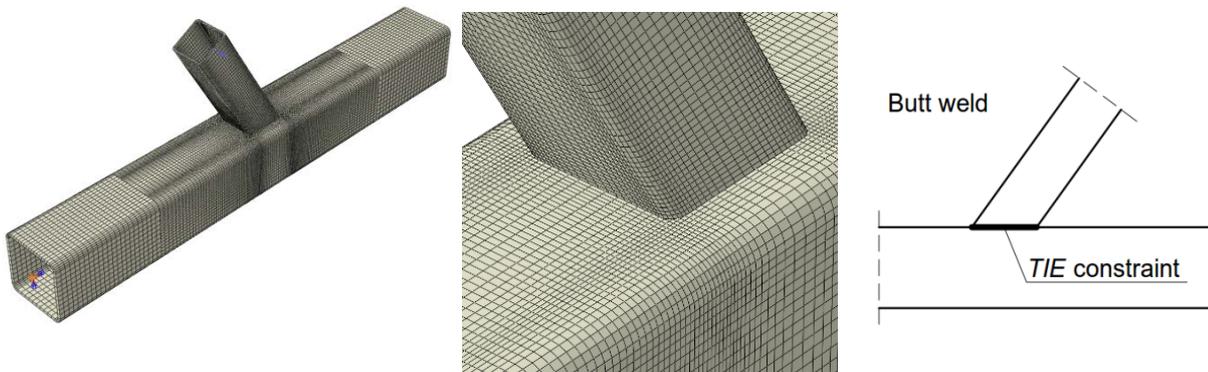


Figure 4. FE model for Y-joint

The material does not influence the stiffness of joints with butt welds, so we applied the elastic material with the modulus of elasticity 210 GPa and Poisson's ratio 0.3.

The analyses were force controlled, and the load step was calculated with “Static, General” procedure. The joint rotation  $C$  was calculated from FEA by extracting the frame behavior from the FEA results, as given in [68].

The FEA models were validated with the tests of LUT [69] in [68]. The verification was done in three steps [70]: moment load in two opposite directions, use of shell elements instead of brick ones and varying the type of brick elements from 8 to 20 nodes. The proposed FEA model seemed to work well and was used for surrogate modeling.

Finally, the list of sample points is presented in Table 1.

Table 1. Sample points

$b_0$	$\beta$	$t_f$	$30^\circ$			$60^\circ$			$90^\circ$			$30^\circ$			$60^\circ$			$90^\circ$		
			$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]	$t_0$	$C$ [kNm/rad]
100	0.400	4	4	55	27	23	6	174	85	72	10	1082	406	345						
100	0.600	4	4	215	86	68	6	634	262	211	10	4007	1229	1013						
100	0.800	4	4	1135	442	343	6	2847	1107	891										
110	0.364	4	4	44	23	20	5	83	43	37	6	140	72	62						
110	0.545	4	4	150	63	50	5	272	116	94	6	450	193	158						
110	0.818	4	4	1457	568	439	5	2349	948	751	6	3536	1389	1117						
120	0.333	4	5	70	37	33	7.1	203	106	92	10	638	291	253						
120	0.583	4	5	364	150	121	7.1	1009	422	345	10	3197	1155	953						
120	0.833	5	5	2923	1170	923	7.1	6637	2532	2047										
140	0.286	4	5	53	30	27	7.1	152	85	76	10	453	231	205						
140	0.571	5	5	353	143	117	7.1	944	399	328	10	2646	1075	891						
140	0.786	5	5	2097	794	618	7.1	4846	1954	1569										
150	0.267	4	6	81	47	42	8.8	262	146	130	12.5	1004	433	382						
150	0.533	5	6	448	191	158	8.8	1372	593	494	12.5	5046	1897	1586						
150	0.800	6	6	3785	1471	1149	8.8	9697	3742	3034										
160	0.250	4	6	73	44	39	8.8	236	135	122	12.5	862	397	353						
160	0.563	5	6	559	232	190	8.8	1677	714	590	12.5	5884	2242	1866						
160	0.750	6	6	2493	943	735	8.8	6531	2617	2111										
180	0.278	4	7.1	148	85	76	8.8	280	158	141	12.5	946	467	415						
180	0.556	6	7.1	896	378	309	8.8	1617	693	571	12.5	5165	2134	1774						
180	0.833	7.1	7.1	8286	3312	2600	8.8	13374	5401	4322										
200	0.250	4	7.1	123	74	66	8.8	233	138	124	12.5	750	402	360						
200	0.550	5	7.1	869	367	295	8.8	1566	673	546	12.5	4910	2040	1672						
200	0.800	7.1	7.1	6690	2589	2020	8.8	10763	4362	3457										
220	0.273	4	8	203	118	105	10	395	226	203	12.5	840	454	405						
220	0.545	7.1	8	1157	490	402	10	2131	922	762	12.5	4347	1899	1580						
220	0.818	7.1	8	11157	4415	3474	10	18372	7443	5944										
250	0.280	4	8.8	285	164	146	10	416	237	212	12.5	859	472	422						
250	0.560	7.1	8.8	1718	721	589	10	2429	1034	848	12.5	4815	2094	1731						
250	0.800	7.1	8.8	12549	4943	3876	10	16880	6768	5384										
260	0.269	4	8.8	267	155	139	10	389	226	203	12.5	798	448	402						
260	0.538	7.1	8.8	1496	639	524	10	2118	916	755	12.5	4175	1842	1527						
260	0.846	8.8	8.8	20765	8271	6441	10	26909	10941	8628										
300	0.267	5	10	390	227	205	12.5	774	445	401										
300	0.533	8	10	2136	908	747	12.5	4114	1795	1486										
300	0.833	10	10	27313	10664	8367	12.5	45620	18624	14858										

## Surrogate model construction

### Attempt I

Today there are a number of methods for surrogate modeling. We started the construction of the surrogate model with a linear regression, but the error term  $R^2$  was rather low. Next we exploited Kriging, as a surrogate model type to approximate deterministic noise-free data. Firstly, we used the DACE toolbox for Matlab [71] with zero, linear and second order regression [72] but we did not manage to construct a reasonable model. For our next surrogate modeling we exploited the ooDACE toolbox for Matlab (hereinafter – ooDACE) [73–74] and those results are reported in the article.

Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 53–76.

We constructed surrogate models of two types: single model (one model for all sample points) and multi-model (with an independent model for every  $b_0$ ). The idea of implementing the second approach was that the variable  $b_0$  is discrete, getting its values from the Ruukki catalogue, with no intermediate values among them. Both types gave rather close results to each other and were used for our final model. It is worth saying that the multi-model requires much less computational time than a single model approach.

Our first validation gave us the following results:  $R^2 = 0.8876$ , average error about 56% and maximum error 678%. To explore the behavior of the model in detail, we plotted the graphs with rotational stiffness in respect to the different variables. Graphical validation demonstrated that the model behaved very unpredictably (Figs. 5–7).

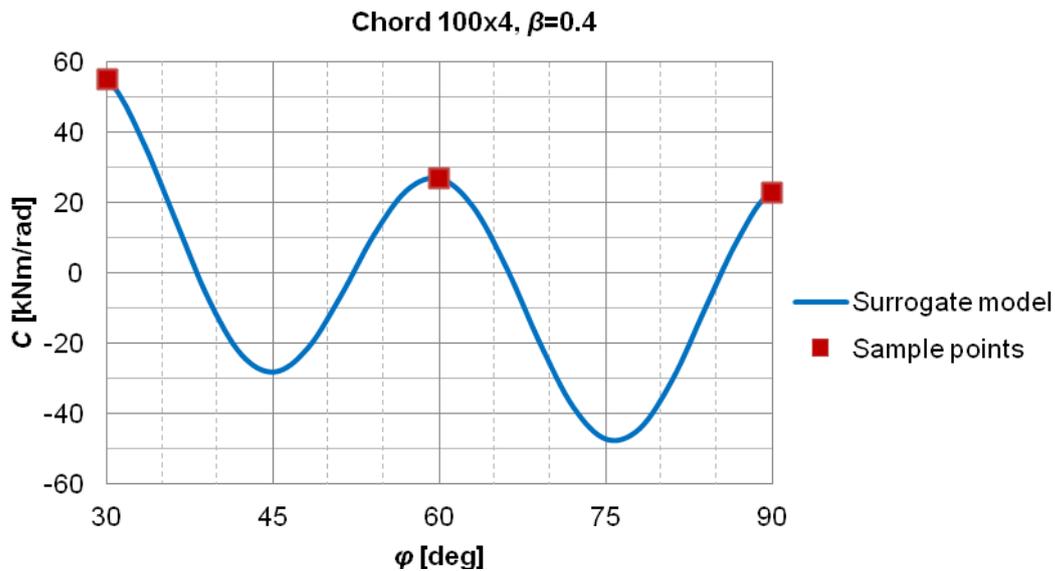


Figure 5. C- $\phi$  response

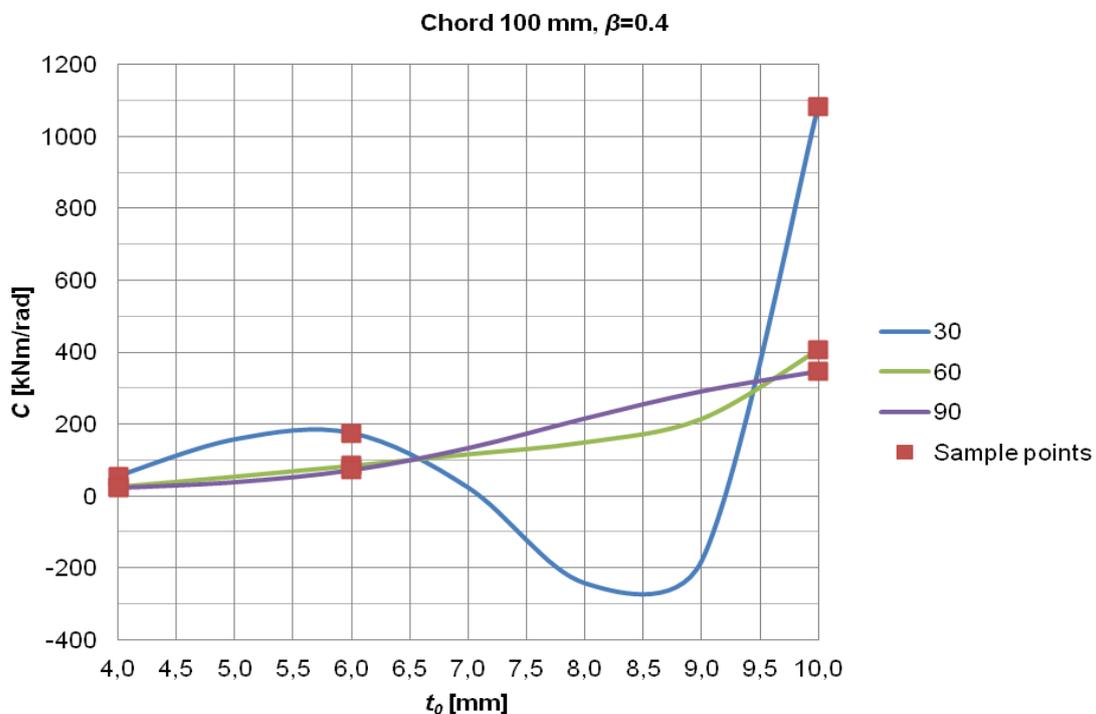


Figure 6. C- $t_0$  response

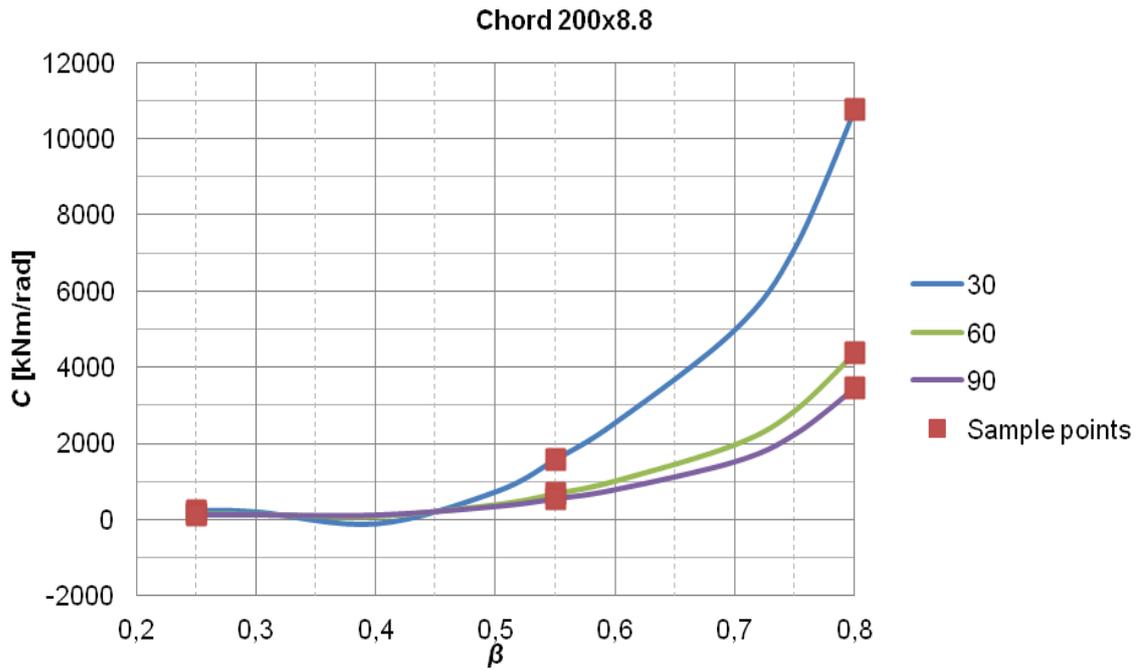


Figure 7. C-β response

Pseudo points

During the validation of our model we came to conclusion that we needed more sample points to make it work properly. Calculating new sample points in Abaqus represented a complicated task and required time, so we decided to implement new points by other means.

To improve the behavior of the model, we decided to add certain boundary conditions for the model. It is obvious that for the angle close to 90 degrees (87...89 degrees) the C-φ curve must have a zero slope ( very close to a horizontal line), see Fig 8. Analytically this means that the partial derivative  $dC/dφ$  must equal to zero. Practically, to apply this boundary condition to a discrete function, we added some sample points for 95 and 100 degrees angles with the same stiffness value as for 90 degrees. To add the boundary conditions for low angles, we extrapolated stiffness for 20 and 25 degrees using the 4<sup>th</sup> order polynomial regression. Moreover, we decided to add the points between the existed sample ones. Graphically it is shown in Fig. 8 (for C-φ response).

We called these additional points that were determined not by Abaqus, but by other means, as “pseudo” points.

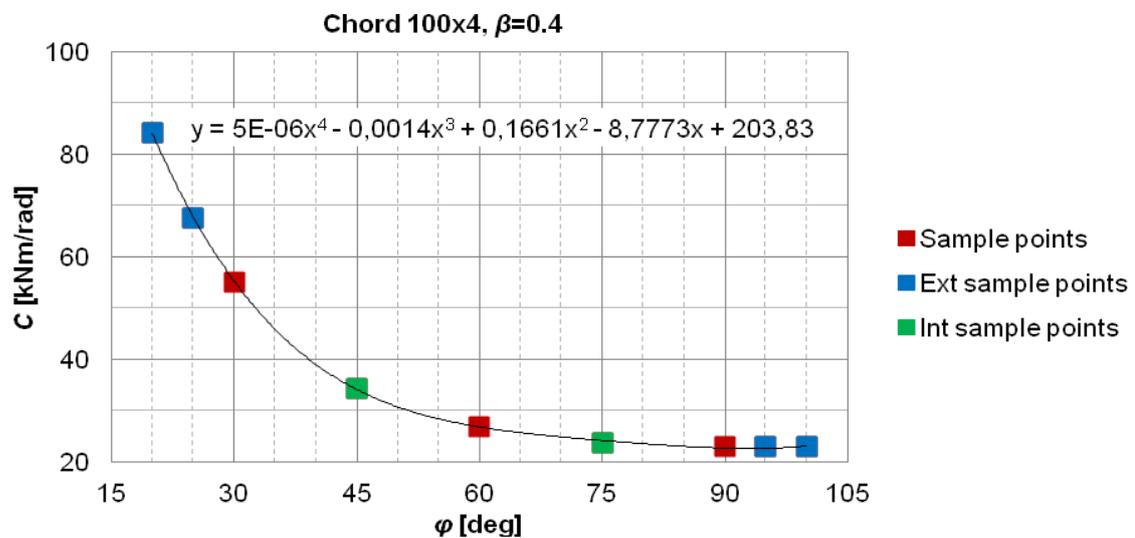


Figure 8. Pseudo points

After applying pseudo points, we managed to improve the  $C$ - $\varphi$  graph (Fig. 9).

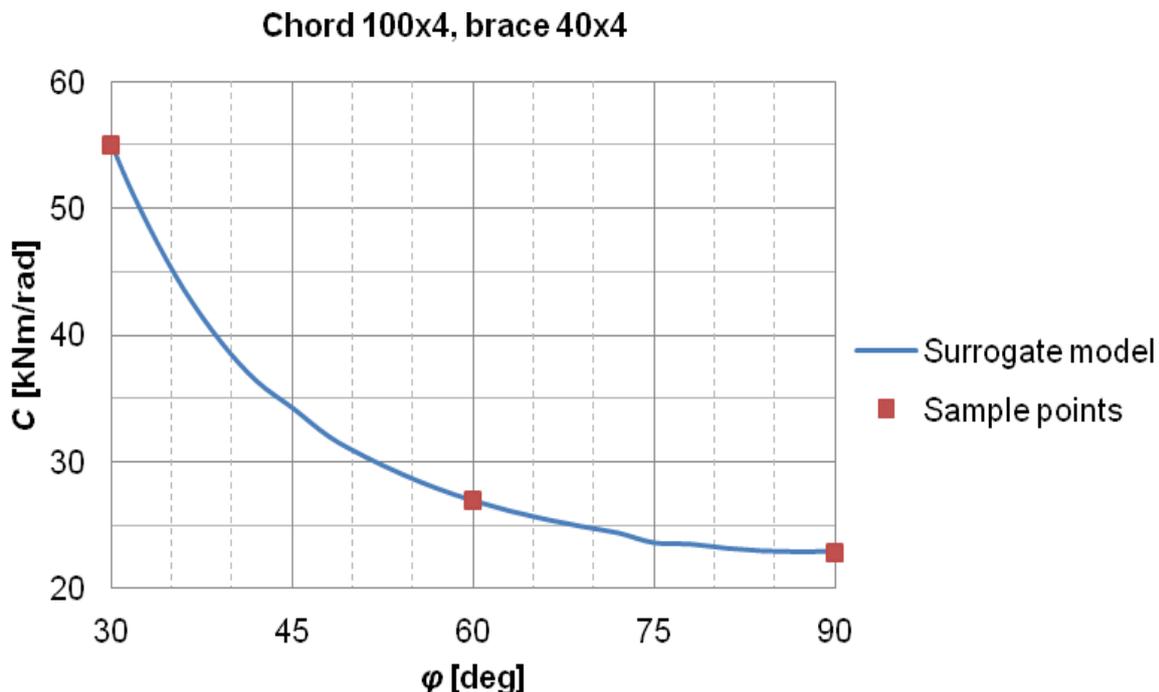


Figure 9. Improved  $C$ - $\varphi$  curve.

To improve the behavior of the surrogate model in respect to other variables ( $t_0$  and  $\beta$ ), we introduced additional pseudo points using the idea that for zero values of these variables stiffness responses got zero values as well. Pseudo points were also added for two thicknesses (one between the lowest and the middle and one between the middle and the highest) and three betas (one between the lowest and the middle and two between the middle and the highest).

Overall, we added 1869 pseudo points (both extrapolated and interpolated), resulting with 285 sample points the total number of 2154 points. The whole range of pseudo points is presented in Table 2 (for 100 mm chord only).

Table 2. Pseudo points

$N_p$	$b_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$\beta$	$\varphi$ [deg]	$C$ [kNm/rad]
Pseudo $\varphi$ int	100	4	0.40	45	36
Pseudo $\varphi$ int	100	4	0.40	75	24
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.40	20	75
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.40	25	64
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.40	95	23
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.40	100	23
Pseudo $\varphi$ int	100	6	0.40	45	113
Pseudo $\varphi$ int	100	6	0.40	75	74
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.40	20	239
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.40	25	203
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.40	95	72
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.40	100	72
Pseudo $\varphi$ int	100	10	0.40	45	602
Pseudo $\varphi$ int	100	10	0.40	75	352
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.40	20	1654
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.40	25	1338
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.40	95	345
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.40	100	345

Garifullin M.R., Barabash A.V., Naumova E.A., Zhuvak O.V., Jokinen T., Heinisuo M. Surrogate modeling for initial rotational stiffness of welded tubular joints. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 53–76. doi: 10.5862/MCE.63.4

№	$b_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$\beta$	$\varphi$ [deg]	C [kNm/rad]
Pseudo $\varphi$ int	100	4	0.60	45	128
Pseudo $\varphi$ int	100	4	0.60	75	71
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.60	20	310
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.60	25	258
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.60	95	68
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.60	100	68
Pseudo $\varphi$ int	100	6	0.60	45	381
Pseudo $\varphi$ int	100	6	0.60	75	219
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.60	20	911
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.60	25	759
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.60	95	211
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.60	100	211
Pseudo $\varphi$ int	100	10	0.60	45	2010
Pseudo $\varphi$ int	100	10	0.60	75	1030
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.60	20	6435
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.60	25	5087
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.60	95	1013
Pseudo $\varphi$ ext	100	10	0.60	100	1013
Pseudo $\varphi$ int	100	4	0.80	45	669
Pseudo $\varphi$ int	100	4	0.80	75	359
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.80	20	1637
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.80	25	1364
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.80	95	343
Pseudo $\varphi$ ext	100	4	0.80	100	343
Pseudo $\varphi$ int	100	6	0.80	45	1653
Pseudo $\varphi$ int	100	6	0.80	75	922
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.80	20	4184
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.80	25	3451
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.80	95	891
Pseudo $\varphi$ ext	100	6	0.80	100	891
Pseudo $t_0$ int	100	5	0.40	30	100
Pseudo $t_0$ int	100	8	0.40	30	466
Pseudo $t_0$ ext	100	0	0.40	30	0
Pseudo $t_0$ ext	100	0.1	0.40	30	0
Pseudo $t_0$ ext	100	12	0.40	30	2225
Pseudo $t_0$ ext	100	12.5	0.40	30	2622
Pseudo $t_0$ int	100	5	0.60	30	374
Pseudo $t_0$ int	100	8	0.60	30	1694
Pseudo $t_0$ ext	100	0	0.60	30	0
Pseudo $t_0$ ext	100	0.1	0.60	30	0
Pseudo $t_0$ ext	100	12	0.60	30	8418
Pseudo $t_0$ ext	100	12.5	0.60	30	9969
Pseudo $t_0$ int	100	5	0.80	30	1896
Pseudo $t_0$ int	100	8	0.80	30	5324
Pseudo $t_0$ ext	100	0	0.80	30	0
Pseudo $t_0$ ext	100	0.1	0.80	30	0
Pseudo $t_0$ ext	100	10	0.80	30	8564
Pseudo $t_0$ ext	100	12	0.80	30	12570
Pseudo $t_0$ ext	100	12.5	0.80	30	13691

Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 53–76.

№	$b_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$\beta$	$\varphi$ [deg]	C [kNm/rad]
Pseudo t0 int	100	5	0.40	60	50
Pseudo t0 int	100	8	0.40	60	201
Pseudo t0 ext	100	0	0.40	60	0
Pseudo t0 ext	100	0.1	0.40	60	0
Pseudo t0 ext	100	12	0.40	60	736
Pseudo t0 ext	100	12.5	0.40	60	843
Pseudo t0 int	100	5	0.60	60	157
Pseudo t0 int	100	8	0.60	60	612
Pseudo t0 ext	100	0	0.60	60	0
Pseudo t0 ext	100	0.1	0.60	60	0
Pseudo t0 ext	100	12	0.60	60	2225
Pseudo t0 ext	100	12.5	0.60	60	2548
Pseudo t0 int	100	5	0.80	60	738
Pseudo t0 int	100	8	0.80	60	2068
Pseudo t0 ext	100	0	0.80	60	0
Pseudo t0 ext	100	0.1	0.80	60	0
Pseudo t0 ext	100	10	0.80	60	3325
Pseudo t0 ext	100	12	0.80	60	4878
Pseudo t0 ext	100	12.5	0.80	60	5312
Pseudo t0 int	100	5	0.40	90	43
Pseudo t0 int	100	8	0.40	90	172
Pseudo t0 ext	100	0	0.40	90	0
Pseudo t0 ext	100	0.1	0.40	90	0
Pseudo t0 ext	100	12	0.40	90	622
Pseudo t0 ext	100	12.5	0.40	90	712
Pseudo t0 int	100	5	0.60	90	126
Pseudo t0 int	100	8	0.60	90	501
Pseudo t0 ext	100	0	0.60	90	0
Pseudo t0 ext	100	0.1	0.60	90	0
Pseudo t0 ext	100	12	0.60	90	1842
Pseudo t0 ext	100	12.5	0.60	90	2112
Pseudo t0 int	100	5	0.80	90	586
Pseudo t0 int	100	8	0.80	90	1690
Pseudo t0 ext	100	0	0.80	90	0
Pseudo t0 ext	100	0.1	0.80	90	0
Pseudo t0 ext	100	10	0.80	90	2740
Pseudo t0 ext	100	12	0.80	90	4041
Pseudo t0 ext	100	12.5	0.80	90	4406
Pseudo $\beta$ int	100	4	0.50	30	89
Pseudo $\beta$ int	100	4	0.70	30	524
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.00	30	0
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.01	30	0
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.90	30	2194
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.95	30	2945
Pseudo $\beta$ int	100	6	0.50	30	293
Pseudo $\beta$ int	100	6	0.70	30	1397
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.00	30	0
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.01	30	0
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.90	30	5308
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.95	30	7035

Garifullin M.R., Barabash A.V., Naumova E.A., Zhuvak O.V., Jokinen T., Heinisuo M. Surrogate modeling for initial rotational stiffness of welded tubular joints. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 53–76. doi: 10.5862/MCE.63.4

№	$b_0$ [mm]	$t_0$ [mm]	$\beta$	$\varphi$ [deg]	C [kNm/rad]
Pseudo $\beta$ int	100	10	0.50	30	2303
Pseudo $\beta$ int	100	10	0.70	30	6136
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.00	30	0
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.01	30	0
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.90	30	11102
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.95	30	12334
Pseudo $\beta$ int	100	4	0.50	60	39
Pseudo $\beta$ int	100	4	0.70	60	205
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.00	60	0
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.01	60	0
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.90	60	859
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.95	60	1156
Pseudo $\beta$ int	100	6	0.50	60	132
Pseudo $\beta$ int	100	6	0.70	60	552
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.00	60	0
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.01	60	0
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.90	60	2054
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.95	60	2721
Pseudo $\beta$ int	100	10	0.50	60	716
Pseudo $\beta$ int	100	10	0.70	60	2053
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.00	60	0
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.01	60	0
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.90	60	5207
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.95	60	6437
Pseudo $\beta$ int	100	4	0.50	90	32
Pseudo $\beta$ int	100	4	0.70	90	160
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.00	90	0
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.01	90	0
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.90	90	666
Pseudo $\beta$ ext	100	4	0.95	90	897
Pseudo $\beta$ int	100	6	0.50	90	109
Pseudo $\beta$ int	100	6	0.70	90	444
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.00	90	0
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.01	90	0
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.90	90	1659
Pseudo $\beta$ ext	100	6	0.95	90	2201
Pseudo $\beta$ int	100	10	0.50	90	596
Pseudo $\beta$ int	100	10	0.70	90	1688
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.00	90	0
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.01	90	0
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.90	90	4312
Pseudo $\beta$ ext	100	10	0.95	90	5344

### Attempt II

Using pseudo points for  $\varphi$ ,  $t_0$  and  $\beta$ , we managed to construct a new surrogate model with the following parameters:  $R^2 = 0.9645$ , average error 8% and maximum error 28 %, 16 points with errors higher than 10% (red points). The same results were observed using a multi-model approach. The graphical validation (Figs. 10, 11) showed that the model behaved properly but its accuracy should be significantly improved.

Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 53–76.

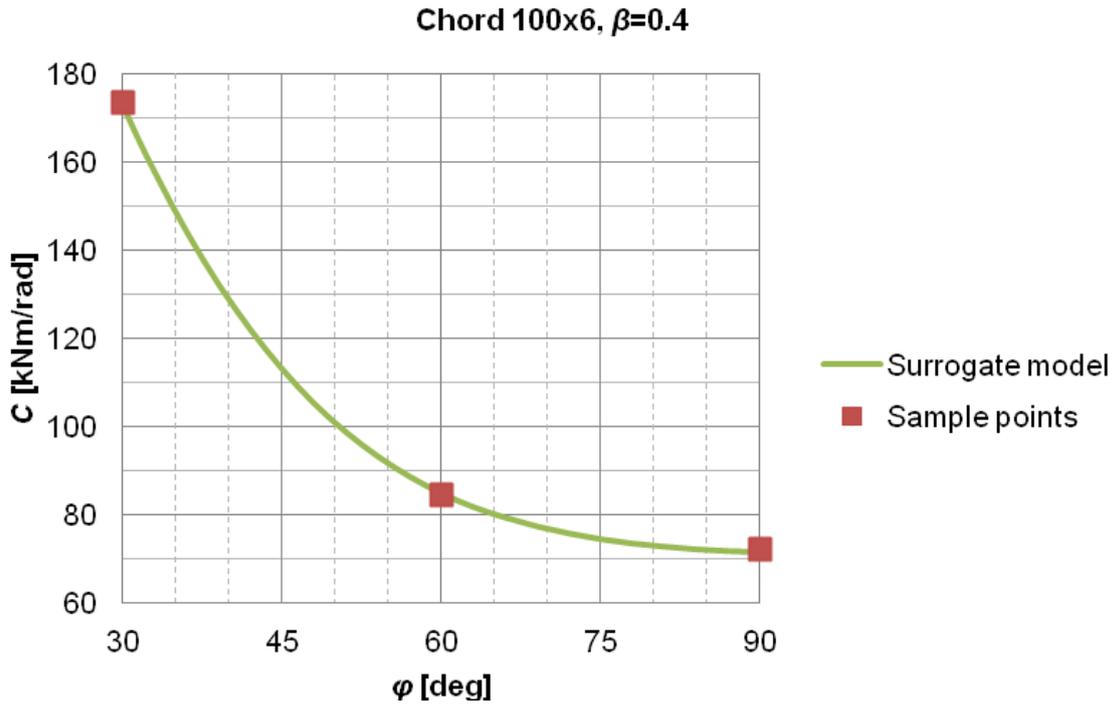


Figure 10. C-φ response

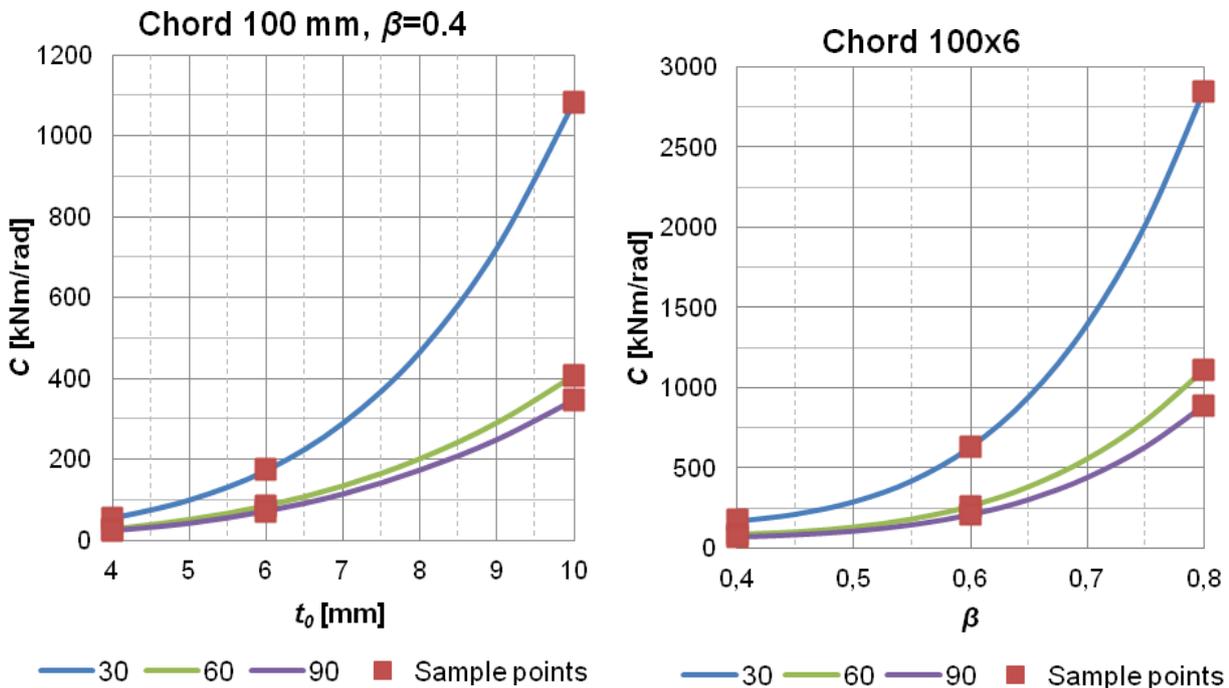
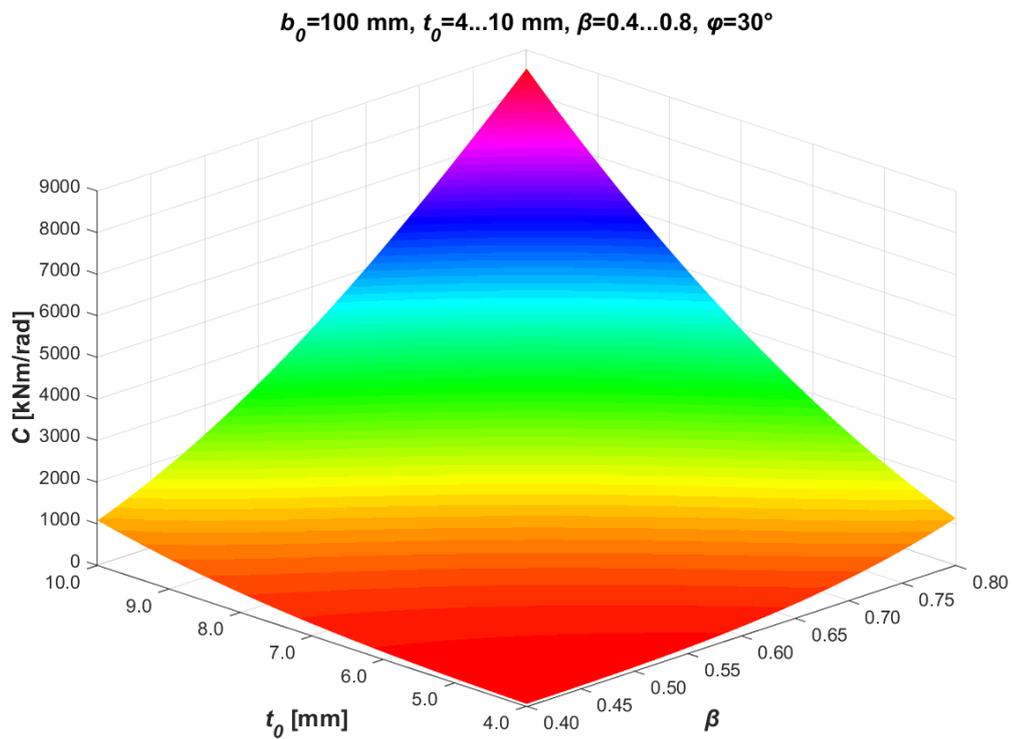
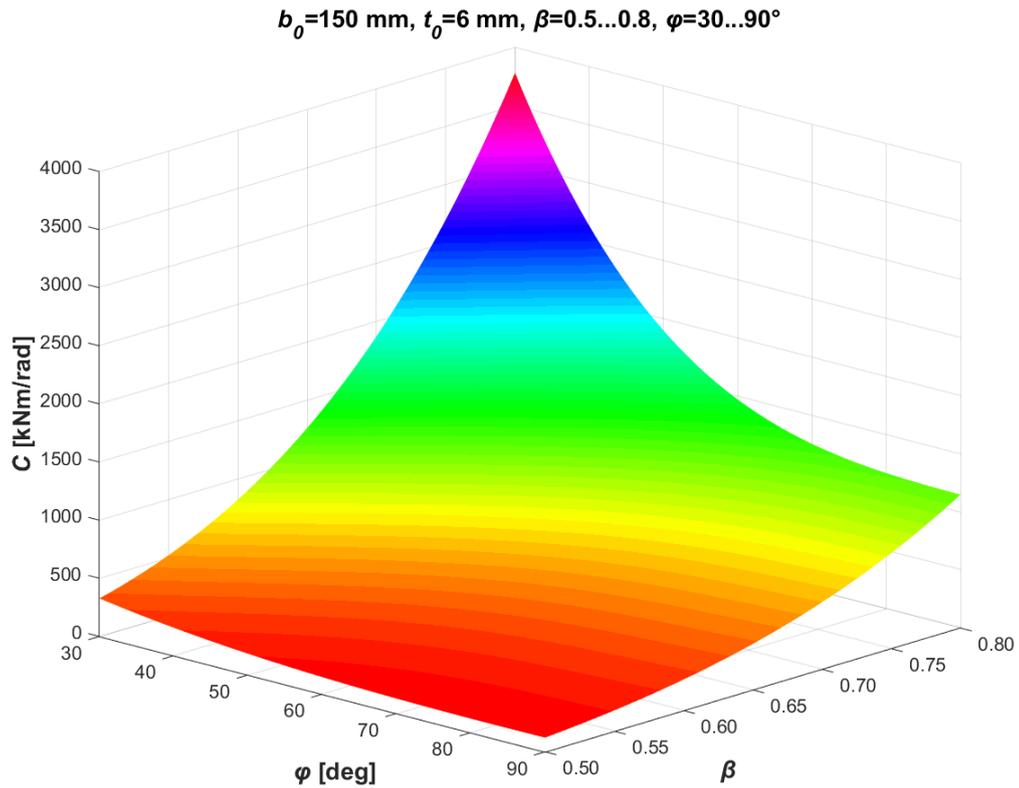


Figure 11. C-t₀ and C-β responses

3D plots in Fig. 12–14 illustrate how the model behaves in respect to several variables simultaneously.



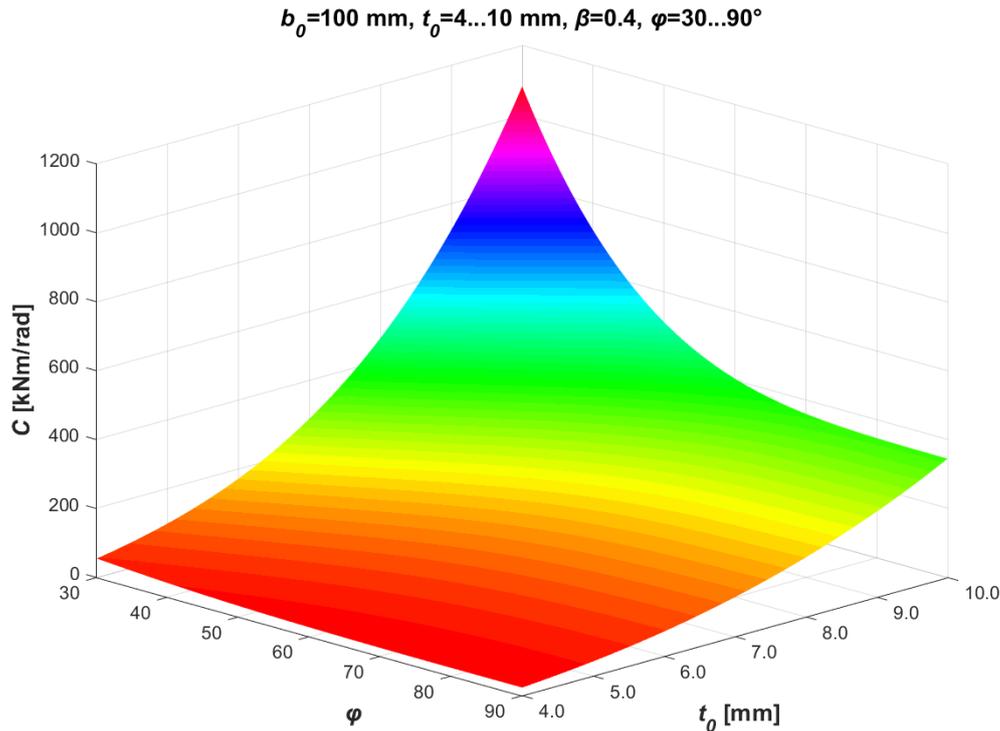


Figure 14.  $C-(t_0+\varphi)$  response

*Accuracy improvements*

Analyzing the validation points, we came to conclusion that all inaccurate cases were related to the points for which  $\beta$  was predicted (only  $\beta$  or together with other variables). As it was mentioned before, when choosing sample points for every case we calculated three betas: minimum (0.25...0.4), middle (0.5...0.55) and maximum (0.8...0.85), let call them  $\beta_1, \beta_2$  and  $\beta_3$  respectively. We have noticed that for the points with  $\beta_1 < \beta < \beta_2$  the predicted values were lower, whereas for the points with  $\beta_2 < \beta < \beta_3$  the opposite trend was observed. Graphically it is shown in Fig. 15.

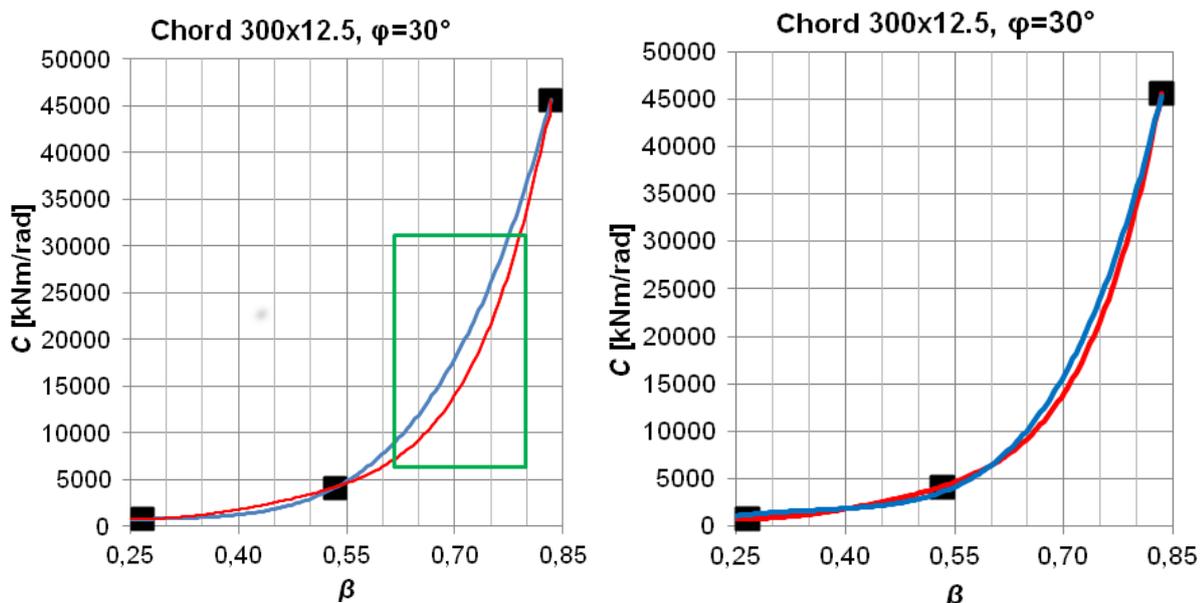


Figure 15. Differences in  $C-\beta$  curves before (left) and after (right) improvements

As it can be seen from the graph, the curve predicted in Excel using three sample points (blue line) did not suit accurately the actual curve obtained by using additional points (red line). This discrepancy led to inaccurate values of pseudo points used later in surrogate modeling and, eventually, caused

considerable errors in predicted values, up to 28% (green rectangular). The same difference was observed for all cases.

To tackle this discrepancy, we modified beta curves by changing pseudo points. It was done manually and had no scientific basis, but it allowed us to receive more accurate curves (Fig. 15).

Having improved  $\beta$  curves, we constructed a new surrogate model. Validation of the models showed that this time the number of red points decreased twice (from 16 to 8), the average error reduced a little (from 8% to 7%). However, for some points extremely high errors were observed (up to 75 %). Validation for a multi-model approach brought slightly different results: 11 red points, 6 % average error and 28 % maximum.

We also noticed a similar difference in  $C-\varphi$  curves. For the points with  $\varphi = 45^\circ$  the stiffness values were about 6% higher, whereas for the points with  $\varphi = 745^\circ$  they were 2% lower. This trend repeated also for the multi-model approach.

To tackle this discrepancy, we applied the same technique as before for  $\beta$  curves and constructed a new surrogate model. We did not manage to receive a working surrogate for the single-model approach, although we did it for the multi-model. The results were rather questionable, although this model predicted the best results for 110 mm chords among the models created before.

Despite the fact that none of improved models met the required criteria of accuracy, they proved that it was possible to modify the model by changing the pseudo points and all these models were used to construct the complex surrogate model.

### *Final model*

For that moment we had 5 surrogate models:

- Two without any improvements (single model and multi-model);
- Two with improved betas (single model and multi-model);
- A multi-model with improved betas and angles.

None of them had satisfactory results. However, their performance was different for various chords. It seemed logical to create a complex model which contained a surrogate model for every chord, which suited it best. Solving this task, every chord was analyzed separately to choose a surrogate model with the best performance. The analysis is given in 0. Here number 1 relates to a model without any improvements, number 2 to the model with improved betas and number 3 to the model with improved betas and angles, SM relates to single model, MM to a multi model.

**Table 3. Complex model**

$b_0$ [mm]	1SM	1MM	2SM	2MM	3MM
100		x			
110					x
120			x		
140			x		
150					x
160				x	
180			x		
200	x				
220			x		
250				x	
260			x		
300			x		

All the models were collected combined in the final model. Its validation is presented in 0. The average error was 4%, maximum 16%.

Table 4. Final validation

Chord		Brace		FEM	Surrogate model		Chord		Brace		FEM	Surrogate model	
$b_0$	$t_0$	$\beta$	$\varphi$	C	C	Error [%]	$b_0$	$t_0$	$\beta$	$\varphi$	C	C	Error [%]
100	8	0.800	79	1838	1735	5.6	180	10	0.389	59	405	391	3.4
100	6	0.400	42	115	122	6.2	180	12.5	0.667	33	8504	9029	6.2
100	10	0.400	80	349	348	0.4	180	10	0.500	40	1085	1096	1.1
100	8	0.500	89	300	285	5.0	180	10	0.611	60	1415	1470	3.9
110	5	0.364	34	71	72	1.4	200	8.8	0.250	69	130	129	1.0
110	6	0.364	55	76	75	1.2	200	12.5	0.400	62	855	811	5.1
110	6	0.364	50	82	81	0.9	200	8	0.300	57	138	131	4.8
110	5	0.818	88	746	748	0.3	200	7.1	0.600	66	448	518	15.5
120	5.6	0.583	80	170	171	0.8	220	8.8	0.545	71	569	547	3.9
120	7.1	0.750	83	1098	1111	1.2	220	12.5	0.455	58	1195	1247	4.4
120	8.8	0.833	42	6030	6726	11.6	220	10	0.409	37	703	819	16.4
120	7.1	0.500	39	399	387	3.0	220	8	0.727	62	1757	1974	12.4
140	7.1	0.357	90	106	113	6.5	250	12.5	0.720	60	6397	6163	3.7
140	6	0.786	89	977	1017	4.1	250	10	0.600	90	1073	1086	1.2
140	7.1	0.500	40	393	400	1.7	250	12.5	0.600	87	2199	2170	1.3
140	6	0.500	30	349	366	4.8	250	8.8	0.280	72	151	151	0.2
150	7.1	0.533	47	405	400	1.2	260	10	0.846	79	8820	8802	0.2
150	7.1	0.800	89	1643	1783	8.5	260	12.5	0.577	67	2135	2115	0.9
150	6	0.400	71	84	77	8.0	260	12.5	0.308	73	498	522	4.8
150	7.1	0.267	39	104	105	0.9	260	12.5	0.692	51	6208	6222	0.2
160	8.8	0.750	86	1946	2102	8.0	300	12.5	0.833	33	39163	40996	4.7
160	10	0.313	76	244	243	0.3	300	12.5	0.467	56	1290	1396	8.2
160	8.8	0.500	85	416	438	5.3	300	12.5	0.833	85	14946	14908	0.3
160	8.8	0.438	81	303	321	6.0	300	12.5	0.600	86	2247	2338	4.1

This is the best surrogate model we managed to construct. Since it met the requirements of accuracy introduced above, we accepted the model to optimize the procedure. The detailed description of the surrogate modeling process is provided in [75]. The model is available for free download at [76].

### Alternative methods

We also tried alternative approaches for constructing the surrogate model.

First a linear regression model [77] using existing Matlab tools was tried. It was found out that the results were not satisfactory. Therefore, the model was restricted to considering only the nearest sampling space to every validation point. It presents a validation point as:

$$x^* = [b_0^* \quad t_0^* \quad \beta^* \quad \varphi^*] \quad (9)$$

The nearest points were chosen to meet the following conditions:

$$\begin{cases} |b_0^* - b_{0i}| < 30 \\ |\beta_0^* - \beta_i| < 0.08 \\ |\varphi_0^* - \varphi_i| < 30 \end{cases} \quad (10)$$

Then the chosen points were sorted by their normalized distances from the validation point:

$$dist_i = \sqrt{\sum_{k=1}^4 \left[ \frac{\max x_k - x_k^*}{\max x_k - \min x_k} \right]^2}, \quad (11)$$

where  $x_1, x_2, x_3, x_4$  relate to  $b_0, t_0, \beta$  and  $\varphi$  respectively.

Then 6 nearest points were taken to form the local linear model. Exploiting this procedure, we managed to construct a model with the following results:  $R^2 = 0.9552$ , average error 21 % and maximum error 115 %.

We tried also an approach using the Matlab toolbox called Polyfitn. It constructs a polynomial regression model using traditional linear least squares techniques. Using this toolbox, we managed to construct a model with the following results:  $R^2 = 0.9552$ , average error 37 % and maximum error 454 %.

We could not be satisfied with none of these models and had to reject both.

## Conclusions

1. There exists no analytical method to calculate the initial rotational stiffness for welded tubular Y joints for different angles  $\varphi$ . Surrogate modeling based on the comprehensive FEA might be a reasonable solution to this task. The developed model can be utilized to optimize tubular frames and trusses, as it avoids resorting to time-consuming FE analyses.

2. In this article the Kriging method, realized in ooDACE toolbox for Matlab, was exploited for surrogate modeling. It was shown that the original number of 285 sample points was not enough to construct a physically reasonable surrogate model. To make the model behave properly, the additional sample (pseudo) points were applied without exploiting the comprehensive FEA. Besides, utilizing Latin Hypercube Sampling (LHS), instead of engineering justification, could avoid the problem of sampling.

3. Interpolated pseudo points can cause a considerable loss of accuracy which can be avoided through several iterations. Main attention should be paid to  $C$ - $\beta$  curves, as the variable  $\beta$  plays a dominating role in the surrogate model behavior.

4. The idea of a multi-model approach might be very effective in surrogate modeling in case some of the variables are of discrete type. In this article the final surrogate model was constructed from several others which had the best performance for every chord width.

5. The surrogate model is constructed for Y joints with butt welds loaded by an in-plane bending moment. However, its application might be expanded to consider other joints and loadings by taking into account the effect of fillet welds, the effect of axial forces, the effect of residual stresses, etc. Moreover, the similar model can be constructed for other types of joints (N, K, KT joints) which are widely used in tubular trusses.

## References

1. European Committee for Standardisation, (CEN). Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1–8: Design of joints (EN 1993-1-8:2005). Brussels, 2005.
2. Grotmann D., Sedlacek G. Rotational stiffness of welded RHS beam-to-column joints. Citect 5BB-8/98. RWTH-Aachen. Aachen. 1998.
3. Al Ali M., The Welding Process as a Local. Issue with Global Consequences. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 969. Pp. 340–344.
4. Al Ali M., Daneshjo N., Size and Distribution of Welding Stresses. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. Pp. 2–7.
5. Garifullin M., Trubina D., Vatin N. Local buckling of cold-formed steel members with edge stiffened holes. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725-726. Pp. 697–702.
6. Vatin N., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: Tests and FEM-Modelling. *Advanced Materials Research*. 2014 Vols. 945-949. Pp. 1211–1215.
7. Vatin N., Sinelnikov A., Garifullin M., Trubina D. Simulation of cold-formed steel beams in global and distortional buckling. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 633-634. Pp. 1037–1041.
8. Vostrov V.K., Vasilkin A.A. Optimizaciya visot poyasov stenki rezervuara [Optimization of heights of zones of a wall of the tank]. *Montazhnye i Spetsial'nye Raboty v Stroitel'stve*. 2005. No. 11. Pp. 37–39.

## Литература

1. European Committee for Standardisation, (CEN). Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1–8: Design of joints (EN 1993-1-8:2005). Brussels, 2005.
2. Grotmann D., Sedlacek G. Rotational stiffness of welded RHS beam-to-column joints. Citect 5BB-8/98 // RWTH-Aachen. Aachen. 1998.
3. Al Ali M., The Welding Process as a Local. Issue with Global Consequences // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 969. Pp. 340–344.
4. Al Ali M., Daneshjo N., Size and Distribution of Welding Stresses // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. Pp. 2–7.
5. Garifullin M., Trubina D., Vatin N. Local buckling of cold-formed steel members with edge stiffened holes // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725-726. Pp. 697–702.
6. Vatin N., Havula J., Martikainen L., Sinelnikov A., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled cross-sections and their joints: Tests and FEM-Modelling // *Advanced Materials Research*. 2014 Vols. 945-949. Pp. 1211–1215.
7. Vatin N., Sinelnikov A., Garifullin M., Trubina D. Simulation of cold-formed steel beams in global and distortional buckling // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 633-634. Pp. 1037–1041.
8. Востров В.К., Василькин А.А. Оптимизация высот поясов стенки резервуара // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2005. № 11. Pp. 37–39.

Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 3(63). С. 53–76.

9. Boel H. Buckling length factors of hollow section members in lattice girders. *Ms. Sci. thesis*. Eindhoven University of Technology. Eindhoven.2010.
10. Snijder H.H., Boel H.D., Hoenderkamp J.C.D., Spoorenberg R.C. Buckling length factors for welded lattice girders with hollow section braces and chords. *Proceedings of Eurosteel*. 2011. Pp. 1881–1886.
11. Prikhodko P.V. *Primeneniye metodov agregatsii ekspertov i regressii na osnove gaussovskikh protsessov dlya postroyeniya metamodeley* Candidate of physico-mathematical sciences dissertation. Moscow institute of physics and technology. Moskow. 2013. Pp.1-26.
12. Roux W.J., Stander N., Haftka R.T. Response surface approximations for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1998. Vol. 42. No. 3. Pp. 517–534.
13. Jin R., Chen W., Simpson T.W. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001. Vol. 23. No. 1. Pp. 1–13.
14. Queipo N.V., Haftka R.T., Shyy W., Goel T., Vaidyanathan R., Kevin Tucker P. Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*. 2005. Vol. 41. Pp. 1–28.
15. Kleijnen J.P.C. Simulation experiments in practice: statistical design and regression analysis. *Journal of Simulation*. 2008. Vol. 2. Pp. 19–27.
16. Müller J. Surrogate Model Algorithms for Computationally Expensive Black-Box Global Optimization Problems. *Tampere University of Technology. Publication 1092*. 2012.
17. Mukhopadhyay T., Dey T.K., Dey S., Chakrabarti A. Optimization of fiber reinforced polymer web core bridge deck – A hybrid approach. *Structural Engineering International*. 2015. Vol. 25. No. 2. Pp. 173–183.
18. Díaz C., Victoria M., Querin O.M., Martí P. Optimum design of semi-rigid connections using metamodels. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 78. Pp. 97–106.
19. Yun G.J., Ghaboussi J., Elnashai A.S. Self-learning simulation method for inverse nonlinear modeling of cyclic behavior of connections. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008. Vol. 197. No. 33-40. Pp. 2836–2857.
20. Jadid M.N., Fairbairn D.R. Neural-network applications in predicting moment-curvature parameters from experimental data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 1996. Vol. 9. No. 3. Pp. 309–319.
21. Anderson D., Hines E.L., Arthur S.J., Eiap E.L. Application of artificial neural networks to the prediction of minor axis steel connections. *Computers & Structures*. 1997. Vol. 63, No. 4. Pp. 685–692.
22. Stavroulakis G.E., Avdelas A.V., Abdalla K.M., Panagiotopoulos P.D. A neural network approach to the modelling, calculation and identification of semi-rigid connections in steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 1997. Vol. 44. No. 1-2. Pp. 91–105.
23. De Lima L.R.O., Vellasco P.C.G. da S., De Andrade S.A.L., Da Silva J.G.S., Vellasco M.M.B.R. Neural networks assessment of beam-to-column joints. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2005. Vol. 27. No. 3. Pp. 314–324.
24. Guzelbey I.H., Cevik A., Göğüş M.T. Prediction of rotation capacity of wide flange beams using neural networks. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. No. 10. Pp. 950–961.
25. Pirmoz A., Gholizadeh S. Predicting of moment-rotation behavior of bolted connections using neural networks. *3rd national congress on civil engineering*. 2007.
9. Boel H. Buckling length factors of hollow section members in lattice girders. // *Ms. Sci. thesis*. Eindhoven University of Technology. Eindhoven.2010.
10. Snijder H.H., Boel H.D., Hoenderkamp J.C.D., Spoorenberg R.C. Buckling length factors for welded lattice girders with hollow section braces and chords // *Proceedings of Eurosteel*. 2011. Pp. 1881–1886.
11. Приходько П.В. Применение методов агрегации экспертов и регрессии на основе гауссовских процессов для построения метамоделей: диссертация ... кандидата физико-математических наук. Московский физико-технический институт. Москва. 2013. С.1-26.
12. Roux W.J., Stander N., Haftka R.T. Response surface approximations for structural optimization // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1998. Vol. 42. No. 3. Pp. 517–534.
13. Jin R., Chen W., Simpson T.W. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2001. Vol. 23. No. 1. Pp. 1–13.
14. Queipo N.V., Haftka R.T., Shyy W., Goel T., Vaidyanathan R., Kevin Tucker P. Surrogate-based analysis and optimization // *Progress in Aerospace Sciences*. 2005. Vol. 41. Pp. 1–28.
15. Kleijnen J.P.C. Simulation experiments in practice: statistical design and regression analysis // *Journal of Simulation*. 2008. Vol. 2. Pp. 19–27.
16. Müller J. Surrogate Model Algorithms for Computationally Expensive Black-Box Global Optimization Problems // *Tampere University of Technology. Publication 1092*. 2012.
17. Mukhopadhyay T., Dey T.K., Dey S., Chakrabarti A. Optimization of fiber reinforced polymer web core bridge deck – A hybrid approach // *Structural Engineering International*. 2015. Vol. 25. No. 2. Pp. 173–183.
18. Díaz C., Victoria M., Querin O.M., Martí P. Optimum design of semi-rigid connections using metamodels // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 78. Pp. 97–106.
19. Yun G.J., Ghaboussi J., Elnashai A.S. Self-learning simulation method for inverse nonlinear modeling of cyclic behavior of connections // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008. Vol. 197. No. 33-40. Pp. 2836–2857.
20. Jadid M.N., Fairbairn D.R. Neural-network applications in predicting moment-curvature parameters from experimental data // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 1996. Vol. 9. No. 3. Pp. 309–319.
21. Anderson D., Hines E.L., Arthur S.J., Eiap E.L. Application of artificial neural networks to the prediction of minor axis steel connections // *Computers & Structures*. 1997. Vol. 63, No. 4. Pp. 685–692.
22. Stavroulakis G.E., Avdelas A.V., Abdalla K.M., Panagiotopoulos P.D. A neural network approach to the modelling, calculation and identification of semi-rigid connections in steel structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 1997. Vol. 44. No. 1-2. Pp. 91–105.
23. De Lima L.R.O., Vellasco P.C.G. da S., De Andrade S.A.L., Da Silva J.G.S., Vellasco M.M.B.R. Neural networks assessment of beam-to-column joints // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2005. Vol. 27. No. 3. Pp. 314–324.
24. Guzelbey I.H., Cevik A., Göğüş M.T. Prediction of rotation capacity of wide flange beams using neural networks // *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. No. 10. Pp. 950–961.
25. Pirmoz A., Gholizadeh S. Predicting of moment-rotation behavior of bolted connections using neural networks // *3rd national congress on civil engineering*. 2007.

Garifullin M.R., Barabash A.V., Naumova E.A., Zhuvak O.V., Jokinen T., Heinisuo M. Surrogate modeling for initial rotational stiffness of welded tubular joints. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 53–76. doi: 10.5862/MCE.63.4

26. Salajegheh E., Gholizadeh S., Pirmoz A. Self-organizing parallel back propagation neural networks for predicting the moment-rotation behavior of bolted connections. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2008. Vol. 9. No. 6. Pp. 625–640).
27. Kim J., Ghaboussi J., Elnashai A.S. Mechanical and informational modeling of steel beam-to-column connections. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. No. 2. Pp. 449–458.
28. Heinisuo M., Garifullin M., Jokinen T., Tiainen T., Mela K. Surrogate modeling for rotational stiffness of welded tubular Y- joints. *Proceedings of the eighth international workshop on connection in steel structures (Connections VIII)*. 2016 (accepted manuscript)
29. Burnayev Ye.V., Panov M., Kononenko D., Konovalenko I. Sravnitelnyy analiz protsedur optimizatsii na osnove gaussovskikh protsessov [Comparative analysis of optimization procedures based on Gaussian processes][Electronic resources]. Sistem requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2012.iitp.ru/pdf/1569602385.pdf> (date of application: 04.11.2015).(rus)
30. Bernshteyn A. V. Intelktualnyy analiz dannykh v teorii nadezhnosti [Data mining in reliability theory ] [Electronic resources]. Sistem requirements: AdobeAcrobatReader. URL: [http://mmr.gubkin.ru/uploads/submitted\\_papers/bernstein%20.pdf](http://mmr.gubkin.ru/uploads/submitted_papers/bernstein%20.pdf) (date of application: 04.11.15).(rus)
31. Matheron G. Principles of geostatistics. *Economic geology*. 1963. Vol. 58. No. 8. Pp. 1246–1266.
32. Sacks J., Schiller S.B., Welch W.J. Designs for computer experiments. *Technometrics*. 1989. Vol. 31. No. 1. Pp. 41–47.
33. Sacks J., Welch W.J., Mitchell T.J., Wynn H.P. Design and analysis of computer experiments. *Statistical science*. 1989. Pp. 409–423.
34. Jones D.R., Schonlau M., Welch W.J. Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global optimization*. 1998. Vol. 13. No. 4. Pp. 455–492.
35. Halonen L., Applying metamodels to parametric structural analysis. *M. Sci. thesis*. Tampere University of Technology. 2012. Pp.84.
36. Kwon H., Yi S., Choi S. Numerical investigation for erratic behavior of Kriging surrogate model. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. Vol. 28. No. 9. Pp. 3697–3707.
37. Balesdent M., Morio J., Marzat J. Kriging-based Adaptive Importance Sampling Algorithms for Rare Event Estimation. *Structural Safety*. Vol. 44. 2013. Pp.1-10.
38. Kaymaz I. Application of kriging method to structural reliability problems. *Structural Safety*. 2005. Vol. 27. Pp.133-151.
39. Zhaoyan Lv, Zhenzhou Lu, Pan Wang. A new learning function for Kriging and its applications to solve reliability problems in engineering. *Computers and Mathematics with Applications*. 2015. Vol. 70. Issue 5. Pp.1182-1197.
40. David J.J. Toal. Some considerations regarding the use of multi-fidelity Kriging in the construction of surrogate models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp.1223-1245.
41. Huachao Dong, Baowei Song, Peng Wang, Shuai Huang. Multi-fidelity information fusion based on prediction of kriging. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Vol. 51. Issue 6. 2015. Pp.1267-1280.
42. Echard B., Gayton N., Lemaire M. AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation. *Structural Safety*. 2011. Vol. 33. Pp.145-154.
43. Fauriat W., Gayton N. AK-SYS: An adaptation of the AK-MCS method for system reliability. *Reliability Engineering and System Safety*. 2014. Vol. 123. Pp.137-144.
44. Xufeng Yang, Yongshou Liu, Yi Gao, Yishang Zhang, Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 3(63). С. 53–76.
26. Salajegheh E., Gholizadeh S., Pirmoz A. Self-organizing parallel back propagation neural networks for predicting the moment-rotation behavior of bolted connections // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2008. Vol. 9. No. 6. Pp. 625–640).
27. Kim J., Ghaboussi J., Elnashai A.S. Mechanical and informational modeling of steel beam-to-column connections // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. No. 2. Pp. 449–458.
28. Heinisuo M., Garifullin M., Jokinen T., Tiainen T., Mela K. Surrogate modeling for rotational stiffness of welded tubular Y- joints // *Proceedings of the eighth international workshop on connection in steel structures (Connections VIII)*. 2016 (accepted manuscript)
29. Бурнаев Е.В., Панов М., Кононенко Д., Коноваленко И. Сравнительный анализ процедур оптимизации на основе гауссовских процессов [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2012.iitp.ru/pdf/1569602385.pdf> (дата обращения: 04.11.2015).
30. Бернштейн А.В. Интеллектуальный анализ данных в теории надёжности [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: [http://mmr.gubkin.ru/uploads/submitted\\_papers/bernstein%20.pdf](http://mmr.gubkin.ru/uploads/submitted_papers/bernstein%20.pdf) (дата обращения: 04.11.15).
31. Matheron G. Principles of geostatistics // *Economic geology*. 1963. Vol. 58. No. 8. Pp. 1246–1266.
32. Sacks J., Schiller S.B., Welch W.J. Designs for computer experiments // *Technometrics*. 1989. Vol. 31. No. 1. Pp. 41–47.
33. Sacks J., Welch W.J., Mitchell T.J., Wynn H.P. Design and analysis of computer experiments // *Statistical science*. 1989. Pp. 409–423.
34. Jones D.R., Schonlau M., Welch W.J. Efficient global optimization of expensive black-box functions // *Journal of Global optimization*. 1998. Vol. 13. No. 4. Pp. 455–492.
35. Halonen L., Applying metamodels to parametric structural analysis // *M. Sci. thesis*. Tampere University of Technology. 2012. Pp.84.
36. Kwon H., Yi S., Choi S. Numerical investigation for erratic behavior of Kriging surrogate model // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014. Vol. 28. No. 9. Pp. 3697–3707.
37. Balesdent M., Morio J., Marzat J. Kriging-based Adaptive Importance Sampling Algorithms for Rare Event Estimation // *Structural Safety*. Vol. 44. 2013. Pp.1-10.
38. Kaymaz I. Application of kriging method to structural reliability problems // *Structural Safety*. 2005. Vol. 27. Pp.133-151.
39. Zhaoyan Lv, Zhenzhou Lu, Pan Wang. A new learning function for Kriging and its applications to solve reliability problems in engineering // *Computers and Mathematics with Applications*. 2015. Vol. 70. Issue 5. Pp.1182-1197.
40. David J.J. Toal. Some considerations regarding the use of multi-fidelity Kriging in the construction of surrogate models // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp.1223-1245.
41. Huachao Dong, Baowei Song, Peng Wang, Shuai Huang. Multi-fidelity information fusion based on prediction of kriging // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2015. Vol. 51. Issue 6. Pp.1267-1280.
42. Echard B., Gayton N., Lemaire M. AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation // *Structural Safety*. 2011. Vol. 33. Pp.145-154.
43. Fauriat W., Gayton N. AK-SYS: An adaptation of the AK-MCS method for system reliability // *Reliability Engineering and System Safety*. 2014. Vol. 123. Pp.137-144.
44. Xufeng Yang, Yongshou Liu, Yi Gao, Yishang Zhang,

- MCS method for system reliability. *Reliability Engineering and System Safety*. 2014. Vol. 123. Pp.137-144.
44. Xufeng Yang, Yongshou Liu, Yi Gao, Yishang Zhang, Zongzhan Gao. An active learning kriging model for hybrid reliability analysis with both random and interval variables. *Struct Multidisc Optim*. 2015. No. 51. Pp. 1003-1016.
  45. Yongkai An, Wenxi Lu, Weiguo Cheng. Surrogate Model Application to the Identification of Optimal Groundwater Exploitation Scheme Based on Regression Kriging Method—A Case Study of Western Jilin Province. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. No. 12. Pp. 8897-8918.
  46. Zhaoyan Lv, Zhenzhou Lu, Pan Wang. A new learning function for Kriging and its applications to solve reliability problems in engineering. *Computers and Mathematics with Applications*. 2015. No. 70. Pp. 1182-1197.
  47. Marrel A., Marie N., De Lozzo M. Advance surrogate model and sensitivity analysis methods for sodium fastreactor accident assessment. *Reliability Engineering and System Safety*. 2015. No. 138. Pp. 232-241.
  48. Jiang Xiangwen, Zhao Qijun, Zhao Guoqing, Li Peng. Integrated optimization Analyses of aerodynamic/sheath characteristics of helicopter rotor based on surrogate model. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2015. No. 28(3). Pp. 737–748.
  49. Bernshteyn A.V., Burnayev Ye.V., Yerofeyev P.D. Eksperimentalnoye sravneniye podkhodov k zadache modelirovaniya mnogoobraziy [Experimental comparison of approaches to the problem of modeling varieties]. *Trudy 55-y nauchnoy konferentsii MFTI*. Tom 1. (Upravleniye i prikladnaya matematika). Moscow.: Izd-vo MFTI, 2012. 98 p. (rus)
  50. Burnayev Ye.V., Zaytsev A.A. Surrogatnoye modelirovaniye raznotochnykh dannykh v sluchaye vyborok bolshogo razmera [Surrogate modeling of multilifidely data for large samples]. *Information processes*. Vol.15. No. 1. 2015. Pp. 97–109.(rus)
  51. Burnayev Ye.V., Panov M.Ye. Ob otsenivanii tochnosti surrogatnykh modeley [About the estimation accuracy of surrogate models]. *Trudy 53-y nauchnoy konferentsii MFTI*. (Sektsiya problem peredachi i obrabotki informatsii). Moscow: Izd-vo MFTI. 2010. Pp. 105-106. (rus)
  52. Burnayev Ye.V., Prikhodko P.V. Metodologiya postroyeniya surrogatnykh modeley dlya approksimatsii prostranstvenno-neodnorodnykh funktsiy [Methodology of construction of surrogate models for the approximation of spatially inhomogeneous functions]. *Trudy MFTI*. Vol. 5. No. 4. (Informatika, matematika). Moscow: Izd-vo MFTI. 2013. Pp. 122-132.(rus)
  53. Bernshteyn A.V., Kuleshov A.P. Kognitivnyye tekhnologii v probleme snizheniya razmernosti opisaniya geometricheskikh obyektov [Cognitive technologies in reducing the problem of dimensionality description of geometric objects]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy*. 2008. No. 2/4. Pp. 6-19. (rus)
  54. Yalaltdinov A.D., Chepyzhov V.V., Chernova S.S. Primeneniye protsedur snizheniya razmernosti k surrogatnoy modeli aerodinamiki kryla samoleta v zadachakh optimizatsii [The use of dimension reduction procedures for surrogate model of aircraft wing's aerodynamics in optimization problems] [Electronic resources]. Sistem requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2011.iitp.ru/pdf/1569459067.pdf> (date of application: 04.11.15). (rus)
  55. Bernshteyn A.V., Kuleshov A.P. Snizheniye razmernosti pri nalichiiy predikatov [Reducing dimension in presence of predicates]. *Information processes*. 2008. Vol. 8. No. 1. Pp. 47-57. (rus)
  56. Belyayev M.G. Uchet osobennostey dizayn eksperimenta pri reshenii zadach approksimatsii v surrogatnom Zongzhan Gao. An active learning kriging model for hybrid reliability analysis with both random and interval variables // *Struct Multidisc Optim*. 2015. No. 51. Pp. 1003-1016.
  45. Yongkai An, Wenxi Lu, Weiguo Cheng. Surrogate Model Application to the Identification of Optimal Groundwater Exploitation Scheme Based on Regression Kriging Method—A Case Study of Western Jilin Province // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. No. 12. Pp. 8897-8918.
  46. Zhaoyan Lv, Zhenzhou Lu, Pan Wang. A new learning function for Kriging and its applications to solve reliability problems in engineering // *Computers and Mathematics with Applications*. 2015. No. 70. Pp. 1182-1197.
  47. Marrel A., Marie N., De Lozzo M. Advance surrogate model and sensitivity analysis methods for sodium fastreactor accident assessment // *Reliability Engineering and System Safety*. 2015. No. 138. Pp. 232-241.
  48. Jiang Xiangwen, Zhao Qijun, Zhao Guoqing, Li Peng. Integrated optimization Analyses of aerodynamic/sheath characteristics of helicopter rotor based on surrogate model // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2015. No. 28(3). Pp. 737–748.
  49. Бернштейн А.В., Бурнаев Е.В., Ерофеев П.Д. Экспериментальное сравнение подходов к задаче моделирования многообразий // *Труды 55-й научной конференции МФТИ*. Том. 1 (Управление и прикладная математика). Москва: Изд-во МФТИ, 2012. 98 с.
  50. Бурнаев Е.В., Зайцев А.А. Суррогатное моделирование разноточных данных в случае выборок большого размера // *Информационные процессы*. Том 15. № 1. 2015. С. 97–109.
  51. Бурнаев Е.В.б Панов М.Е. Об оценивании точности суррогатных моделей // *Труды 53-й научной конференции МФТИ (Секция проблем передачи и обработки информации)*. Москва: Изд-во МФТИ, 2010. С. 105-106.
  52. Бурнаев Е.В., Приходько П.В. Методология построения суррогатных моделей для аппроксимации пространственно неоднородных функций // *Труды МФТИ*. Том 5 №4. (Информатика, математика). Москва: Изд-во МФТИ. 2013. С. 122-132.
  53. Бернштейн А.В., Кулешов А.П. Когнитивные технологии в проблеме снижения размерности описания геометрических объектов // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2008 № 2/4. С. 6-19.
  54. Ялалетдинов А.Д., Чепыжов В.В., Чернова С.С. Применение процедур снижения размерности к суррогатной модели аэродинамики крыла самолёта в задачах оптимизации [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2011.iitp.ru/pdf/1569459067.pdf> (дата обращения: 04.11.15).
  55. Бернштейн А.В., Кулешов А.П. Снижение размерности при наличии предикатов // *Информационные процессы*. 2008. Vol. 8. № 1. Pp. 47-57.
  56. Беляев М.Г. Учёт особенностей дизайн эксперимента при решении задач аппроксимации в суррогатном моделировании [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2013.iitp.ru/disk/pdf/1569754979.pdf> (дата обращения: 04.11.15).
  57. Назаренко А.М. Эффективный алгоритм многокритериальной суррогатной оптимизации: выпускная квалификационная работа на степень магистра. ИППИ РАН. Москва. 2013. С. 1-48.
  58. Бурнаев Е.В., Янович Ю.А.. Построение гладких суррогатных моделей // *Труды 53-й научной конференции МФТИ (Секция проблем передачи и обработки информации)*. Москва: Изд-во МФТИ, 2010.
- Garifullin M.R., Barabash A.V., Naumova E.A., Zhuvak O.V., Jokinen T., Heinisuo M. Surrogate modeling for initial rotational stiffness of welded tubular joints. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 53–76. doi: 10.5862/MCE.63.4

- modelirovani [Accounting features of experimental design for solving approximation tasks in surrogate modeling] [Electronic resources]. Sistem requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2013.iitp.ru/disk/pdf/1569754979.pdf> (date of application: 04.11.15). (rus)
57. Nazarenko A.M. *Effektivnyy algoritm mnogokriterialnoy surrogatnoy optimizatsii: vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota na stepen magistra* [An efficient algorithm for multiobjective surrogate optimization: Final qualifying work on a master's degree]. IITP RAS. Moscow. 2013. Pp. 1-48. (rus)
58. Burnayev Ye.V., Yanovich Yu.A. *Postroyeniye gladkikh surrogatnykh modeley* [Construction of smooth surrogate models]. *Trudy 53-y nauchnoy konferentsii MFTI. (Seksiya problem peredachi i obrabotki informatsii)*. Moscow. : Izd-vo MFTI, 2010. Pp. 103-104. (rus)
59. Burnayev Ye. V., Yerofeyev P., Zaytsev A., Kononenko D., Kapushev Ye. *Surrogatnoye modelirovaniye i optimizatsiya profilya kryla samoleta na osnove gaussovskikh protsessov* [Surrogate modeling and optimization of aircraft wing profile based on Gaussian processes] [Electronic resources]. Sistemrequirements: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2012.iitp.ru/pdf/1569602325.pdf> (date of application: 04.11.2015). (rus)
60. Kornilov M.V., Sysoyev I.V., Bezruchko B.P. *Optimalnyy podbor parametrov prognosticheskikh modeley v metode nelineynoy prichinnosti po Greyndzheru v prilozhenii k signalam, kharakterizuyemyimi khorosho vyrazhennymi vremennymi masshtabami* [Optimal selection of parameters of the forecasting models used for the nonlinear Granger causality method in application to the signals with a main time scales]. *Izhevsk: NITs «RKhD»*. 2014. Vol. 10. No. 3. Pp. 279-295. (rus)
61. Kornilov M.V., Sysoyev I.V. *Vliyaniye vybora struktury modeli na rabotosposobnost metoda nelineynoy prichinnosti po Greyndzheru* [Influence of the choice of the model structure for working capacity of nonlinear Granger causality approach]. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2013. Vol. 21. No. 2. Pp. 74-87. (rus)
62. Lee T., Jung, J. *Metamodel-based shape optimization of connecting rod considering fatigue life*. *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 306-308. Pp. 211–216.
63. McKay M.D., Bechman R.J., Conover W.J. *A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code*. *Technometrics*. 1979. Vol. 21. No. 2. Pp. 239–245.
64. Fang K.T., Li R., Sudjianto A. *Design and modeling for computer experiments*. Chapman & Hall/CRC. 2006.
65. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons. 2012.
66. European Committee for Standardisation, (CEN). *Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700 (EN 1993-1-12: 2007)*. Brussels. 2007
67. *European Committee for Standardisation, (CEN). Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels. Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties (EN 10219-2:2006)*. Brussels. 2006
68. Haakana Ä. *In-Plane Buckling and Semi-Rigid Joints of Tubular High Strength Steel Trusses*. Ms. Sci. thesis. Tampere University of Technology. 2014.
69. Tuominen N., Björk T. *Ultimate Capacity of Welded Joints Made of High Strength Steel CFRHS*. *Proceedings of Eurosteel*. 2014. Pp. 83–84.
70. Mela K., Heinisuo M. *Weight and cost optimization of welded high strength steel beams*. *Proceeding of the METNET Seminar 2013 in Lulea*. 2014. Pp 44-55
71. Lophaven S.N., Søndergaard J. and Nielsen H.B. *DACE, Гарифуллин М.Р., Барабаш А.В., Наумова Е.А., Жувак О.В., Йокинен Т., Хейнисуо М. Суррогатное моделирование для определения начальной жесткости вращения сварных трубчатых соединений // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 53–76.*
- С. 103-104.
59. Бурнаев Е.В., Ерофеев П.Д., Зайцев А.А., Кононенко Д., Капушев Е. *Суррогатное моделирование и оптимизация профиля крыла самолёта на основе гауссовских процессов* [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://itas2012.iitp.ru/pdf/1569602325.pdf> (дата обращения: 04.11.2015).
60. Корнилов М.В., Сысоев И.В., Безручко Б.П. *Оптимальный подбор параметров прогностических моделей в методе нелинейной причинности по Грейнджеру в приложении к сигналам, характеризующим хорошо выраженными временными масштабами* // НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. 2014. Vol. 10. № 3. Pp. 279-295.
61. Корнилов М.В., Сысоев И.В. *Влияние выбора структуры модели на работоспособность метода нелинейной причинности по Грейнджеру* // Изв. вузов. ПНД. 2013. Том 21. № 2. С. 74-87.
62. Lee T., Jung, J. *Metamodel-based shape optimization of connecting rod considering fatigue life* // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 306-308. Pp. 211–216.
63. McKay M.D., Bechman R.J., Conover W.J. *A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code* // *Technometrics*. 1979. Vol. 21. No. 2. Pp. 239–245.
64. Fang K.T., Li R., Sudjianto A. *Design and modeling for computer experiments*. Chapman & Hall/CRC. 2006.
65. Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons. 2012.
66. European Committee for Standardisation, (CEN). *Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700 (EN 1993-1-12: 2007)*. Brussels. 2007
67. European Committee for Standardisation, (CEN). *Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels. Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties (EN 10219-2:2006)*. Brussels. 2006
68. Haakana Ä. *In-Plane Buckling and Semi-Rigid Joints of Tubular High Strength Steel Trusses* // Ms. Sci. thesis. Tampere University of Technology. 2014.
69. Tuominen N., Björk T. *Ultimate Capacity of Welded Joints Made of High Strength Steel CFRHS* // *Proceedings of Eurosteel*. 2014. Pp. 83–84.
70. Mela K., Heinisuo M. *Weight and cost optimization of welded high strength steel beams* // *Proceeding of the METNET Seminar 2013 in Lulea*. 2014. Pp 44-55
71. Lophaven S.N., Søndergaard J., Nielsen H.B. *DACE, A MATLAB Kriging Toolbox Version 2.0*. August 1. Technical University of Denmark, Copenhagen. 2002.
72. Heinisuo M., Mela K., Tiainen T., Jokinen T., Baczkiewicz J. and Garifullin M. *Surrogate model for rotational stiffness of welded tubular Y-joints* // *Proceedings of the METNET Seminar 2015 in Budapest*. 2015. Pp. 18–39.
73. Couckuyt I., Dhaene T., Demeester P. *ooDACE Toolbox: A Flexible Object-Oriented Kriging Implementation* // *Journal of Machine Learning Research*. 2014. Vol. 15. Pp. 3183–3186.
74. Ulaganathan S., Couckuyt I., Deschrijver D., Laermans E., Dhaene T. *A Matlab Toolbox for Kriging Metamodeling* // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 51 Pp. 2708–2713.
75. Garifullin M., Jokinen T. and Heinisuo M. *Supporting document for surrogate model construction of welded HSS tubular Y-joints* // Tampere University of Technology, Tampere. Publication 164. 2016.
76. Research Centre of Metal Structures. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL:<http://metallirakentaminen.fi/> (дата обращения:

- A MATLAB Kriging Toolbox Version 2.0. August 1.* Technical University of Denmark, Copenhagen.2002.
72. Heinisuo M., Mela K., Tiainen T., Jokinen T., Baczkiewicz J. and Garifullin M. Surrogate model for rotational stiffness of welded tubular Y-joints. *Proceedings of the METNET Seminar 2015 in Budapest.* 2015. Pp. 18–39.
73. Couckuyt I., Dhaene T., Demeester P. ooDACE Toolbox: A Flexible Object-Oriented Kriging Implementation. *Journal of Machine Learning Research.* 2014. Vol. 15. Pp. 3183–3186.
74. Ulaganathan S., Couckuyt I., Deschrijver D., Laermans E., Dhaene T. A Matlab Toolbox for Kriging Metamodelling. *Procedia Computer Science.* 2015. Vol. 51 Pp. 2708–2713.
75. Garifullin M., Jokinen T. and Heinisuo M. Supporting document for surrogate model construction of welded HSS tubular Y-joints. *Tampere University of Technology, Tampere. Publication 164.* 2016.
76. Research Centre of Metal Structures. [Electronic resources]. Sistem requirements: AdobeAcrobatReader. URL:<http://metallirakentaminen.fi/> (date of application: 29.01.16)
77. Tiainen T., Heinisuo M., Jokinen T. and Salminen M. Steel building optimization applying metamodel techniques // *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics).* 2012. Vol. 45. No. 3. Pp. 152–161.

Marsel Garifullin,  
+7(999)0346070; 273marcel@gmail.com

Aleksandra Barabash,  
+79633129679; aleksandra17au@yandex.ru

Elizaveta Naumova,  
89215965574; Les95i@mail.ru

Oksana Zhuvak,  
8(911)0961816; zhuwak2010@mail.ru

Timo Jokinen,  
+358401981280; timo.jokinen@tut.fi

Markku Heinisuo,  
+35804(0)5965826; markku.heinisuo@tut.fi

Марсель Ринатович Гарифуллин,  
+7(999)0346070; эл. почта:  
273marcel@gmail.com

Александра Викторовна Барабаш,  
+79633129679; эл. почта:  
aleksandra17au@yandex.ru

Елизавета Алексеевна Наумова,  
89215965574; эл. почта: Les95i@mail.ru

Оксана Владимировна Жувак,  
8(911)0961816; эл. почта: zhuwak2010@mail.ru

Тимо Йокинен,  
+358401981280; эл. почта: timo.jokinen@tut.fi

Маркку Хейнисуо,  
+35804(0)5965826; эл. почта:  
markku.heinisuo@tut.fi

© Garifullin M.R., Barabash A.V., Naumova E.A., Zhuvak O.V., Jokinen T., Heinisuo M., 2016

doi: 10.5862/MCE.63.5

## Construction management in terms of indicator of the successfully fulfilled production task

### Управление строительным производством с учетом показателя успешного выполнения производственного задания

**V.G. Burlov,  
A.M. Grobitski,**  
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University, St. Petersburg, Russia*

**Д-р техн. наук, профессор В.Г. Бурлов,  
аспирант А.М. Гробицкий,**  
*Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, Санкт-  
Петербург, Россия*

**A.M. Grobitskaya**  
*Grodno State Agrarian University, Grodno, Belarus*

**Канд. филол. наук, доцент А.М. Гробицкая**  
*Гродненский государственный аграрный  
университет, Гродно, Республика Беларусь*

**Key words:** management; manager's decision;  
model; feedback; problem; graph

**Ключевые слова:** управление; решение  
руководителя; модель; обратная связь;  
проблема; граф

**Abstract.** The article considers the model of the administrative decision based on synthesis It allows knowing the results of task implementation in advance. With this model it is possible to create conditions for a guaranteed solution to the task. The authors have built a schematic diagram for obtaining a management decision. The article shows how to form the concept of maintaining the social system based on feedback, following the integrity conservation law. The authors provide the technique that links three basic components (situation, situation monitoring, problem solving) in the process of taking an adequate decision in the construction area. The indicator for the impact of the successfully implemented industrial task on the task implementation has been calculated.

**Аннотация.** В статье разрабатывается модель управленческого решения на основе синтеза, что позволяет заранее знать результаты выполнения задач. На основе такой модели становится возможным гарантированное выполнение задачи. Построена структурная схема получения управленческого решения. Показано, как с применением закона сохранения целостности формируется концепция поддержания функционирования социальной системы на основе обратной связи. Приведена методика, увязывающая три базовых компонента – обстановка; мониторинг обстановки; работа по устранению проблем – при принятии адекватного решения в строительстве. Выполнен расчет влияния показателя успешного выполнения производственного задания на вероятность выполнения задания.

### Introduction

The formation of management functions is one of the most difficult issues in construction. As U.R. Ashbee notes, "The natural criterion of management efficiency is the degree of correspondence of managing impacts on the states of a management object in every cycle of management. There is a deviation of the state of the management object from the required state in real-life management" [1].

The construction process is managed on the basis of the manager's decision. The literature on the issues of forming an administrative decision suggests only the results that are aimed at the formation of mathematical methods to validate the decision, rather than the mathematical model of the administrative decision [2, 3].

The works [4–7] are devoted to the problem with the definition of the most important indicator, according to which one can determine reliability of a construction company (a contractor). Actually, the researchers concluded that the lowest price is not a central indicator that must be used when selecting a

Бурлов В.Г., Гробицкий А.М., Гробицкая А.М. Управление строительным производством с учетом показателя успешного выполнения производственного задания // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 77–91.

contractor. The main criterion for the reliability of the contractor is to provide the required standard of work within the time limits set and within the approved budget [4]. In [5] the method of multicriteria analysis to select a contractor and evaluate tender bids, based on the utility theory, is considered. The process of analytic hierarchy with many criteria is considered in [6]. Some authors believe that success of the project depends on the price, time, cost and quality of work, while others believe that it is something more complex. In [7] the system for measuring success of construction projects is developed.

Any activity is based on a person's decision and in well-known publications the methods of justification are used [8–12]. In solving management tasks one can use necessary and sufficient conditions. The necessary conditions are the ones under which it is assumed that the process satisfies certain properties. This approach is valid only when the process exists by definition. However, a necessary condition does not guarantee us activity goal achievement. In [8] the authors present the building process in the framework of a Markov process of a "birth and death" type, followed by probability distribution calculation. The process of searching for optimal management decisions is discussed in [9]. We find an algorithm for developing a model of managing a construction company, using logical and analytical methods of the quantitative analysis.

The author of [10] concludes that implementing the concept of sustainable development for socio-economic systems is primarily connected with the strengthening of public administration and the creation of new centers for producing innovations. The authors in [11] offer to present the model construction in the form of two kinds of knowledge: formal and heuristic. In [12] an innovative technology of managing socio-economic systems of different hierarchical levels, based on a synergistic approach, allowing for the use of methods of nonlinear modeling and advanced software for computers, is offered.

There are two approaches to the development of the system: an approach based on analysis and synthesis. The one based on synthesis implies the knowledge of the law, but the other based on analysis does not guarantee the desired result. According to the papers presented in the review there can only be a general analysis without detailed recommendations. However, [13] presented the approach to the development of a mathematical model for a management decision.

## Methods

Difficulties of any process are incompliance of the received results with the demanded ones which is grounded in contradictory conclusions. To exclude contradictory conclusions, the axiomatic method is used [13].

The axiomatic method presupposes the existence of the following components:

- basic assumptions and statements that are usually expressed in some basic principles;
- basic notions, key words, axioms, rules of inference, theorems;
- basic principles should characterize the core of the process under work.

There are three components included in the activity: a person (his consciousness), the outside world (the object) and universal connection. Accordingly, these three components are reflected in the following three principles:

- First – this is the principle of three-component knowledge.

Component A. Abstract representation (A condition of the existence of a process. It answers the question "What?").

Component B. Abstract-specific representation (Cause-consequence relationships. (Methods). It answers the question "Why?").

Component C. Specific representation (Technologies. Algorithms. It answers the question "How?").

- Second – this is the principle of the world's integrity. It is realized by the integrity conservation law referring to an object.

This is a stable objective recurring connection of the object properties with the ones of its purposeful functioning. It is manifested in the mutual transformation of the object properties and the properties of its functioning for a fixed purpose [13].

- Third – this is the principle of the world's knowability. It is realized by three methods of scientific knowledge: decomposition, abstraction, aggregation. Knowledge is reduced to the establishment of laws. This is the essence of the aggregate (aggregation). But this is possible only

through decomposition and abstraction. The reverse process is carried out while realizing. From the "aggregate" – a law, a specific object is created through abstraction and decomposition.

To solve a task, it is necessary to understand what the model of a correctly built system should be. This model will meet the demands of a particular situation.

To describe the given model, one should understand what is meant by the notion "model".

A model is a description or representation of an object corresponding to the given object and allowing obtaining necessary characteristics of this object [13]. The model should have the following key features:

- it is in objective accordance with the object (system) being perceived (learnt);
- it substitutes the given object (system) in some particular relation;
- it gives some information about this object, resulting from the research of the model and the corresponding rules of transmission "model – object" (prototype) [14].

The problem of correlation between a model and a modeled process is a topical problem in the course of modeling. The adequacy of a model can be estimated by comparing it with the standard or experiment results.

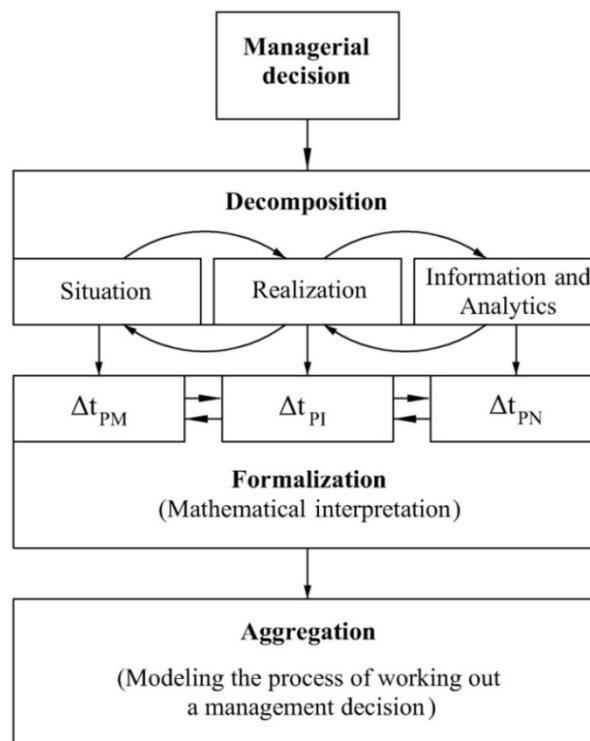
There exist two approaches to the system engineering – analysis and synthesis [15].

While analyzing (solving the problem of choice) there is a set of physical elements and it is required to predict the possible result of the system functioning (some output characteristics). That is, it is necessary to form one variant of the system, another and so on. Having analyzed the result of functioning each of them, the variant that meets the conditions to the fullest is chosen.

With synthesis there is a set of output characteristics of the projected system and it is required to define the quantitative and qualitative makeup of the system.

That is, with analysis a task is solved "from the beginning" and the result is analyzed, whereas with synthesis a task is solved "from the end", from the desired result, and the system with the required output characteristics is formed.

The methods of decomposition, abstraction (mathematical interpretation) and aggregation take a central place in system modeling (Fig. 1) [16, 17].



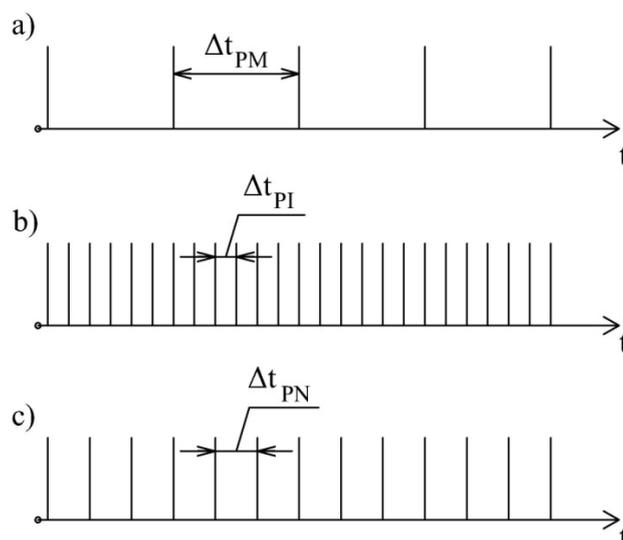
**Figure 1. The schematic structure of taking a management decision**

Decomposition is a scientific method in which the research of a system (model) is totally replaced with the research of its separate subsystems (sub-models), done allowing for their mutual influence on one another, and, if possible, the full reflection of integral qualities of the system [16, 17].

Aggregation is a scientific method in which the multitude of elements (subsystems) of a model (system) is replaced with the elements called aggregates, which the aggregated model is built upon. This model has a substantially smaller number of dimensions than the original one, but it reflects well enough the qualities of the system in its essence [16, 17].

In the building process a manager encounters external challenges that need to be detected and neutralized. Problems arise with a certain average frequency:

- Problems occur with the frequency equal to  $\Delta t_{PM}$  – the average development time of the problem (Fig 2a).
- To neutralize the problem, the manager must be due to identify it, and the problem should be identified until the next one arises. The problems are identified with the frequency equal to  $\Delta t_{PI}$  – the average identification time of the problem (Fig. 2b).
- After identifying the manager starts neutralizing a problem with the help of resources. Problems are neutralized with the frequency equal to  $\Delta t_{PN}$  – the average neutralization time of the problem (Fig. 2c).



**Figure 2. Diagram of problems:**  
**a) the rate of problem occurrence; b) the time of problem identification; c) the time of problem neutralization**

At present schemes, based on the analysis approach, are used, i.e. a launched process with input and output (Fig. 3). In the scheme like that, disturbances are not taken into account. Thus, if disturbances affecting the process are not taken into account, the process breaks down. In order to avoid such a course of events, the authors have formed the concept of maintaining a social system based on feedback led by a manager (Fig. 4).

An approach based on the analysis of the model, as mentioned above, does not allow an adequate response to changing situations. Because of this, the deadlines of construction are often not met. An approach based on the synthesis of the model, which the authors suggest, allows forming a process with predetermined properties, hereby this guarantees achievement of the management objective. The model based on synthesis allows a significant reduction of time expenditures due to the fact that the objective feedback has been built [18].

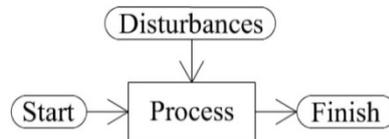


Figure 3. The concept of the social system based on the analysis approach

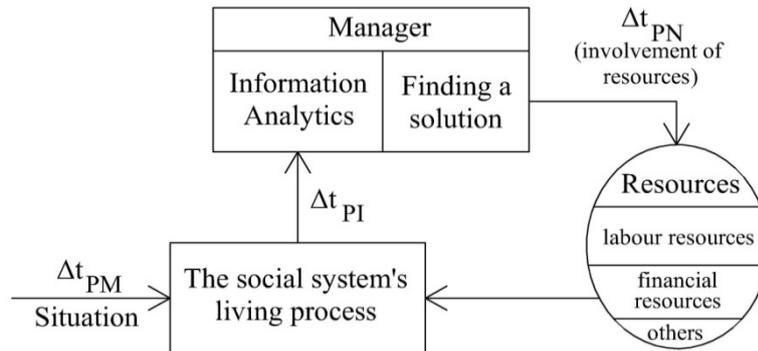


Figure 4. The concepts of maintaining the social system functioning based on feedback

Applying the integrity conservation law, the concept of maintaining the social system functioning based on feedback is formed (Fig. 4) [13, 19].

Figure 5 is a scheme of the gnoseological meaning for the object integrity conservation law. This representation of a substantiated sufficiently objective development of the system's image and modes of application allows considering it as a certain set of ordered elements located "beneath the surface of the cone." The cone generators "are described" by the law of the system's integrity conservation and define directions of specifying the synthesis [20].

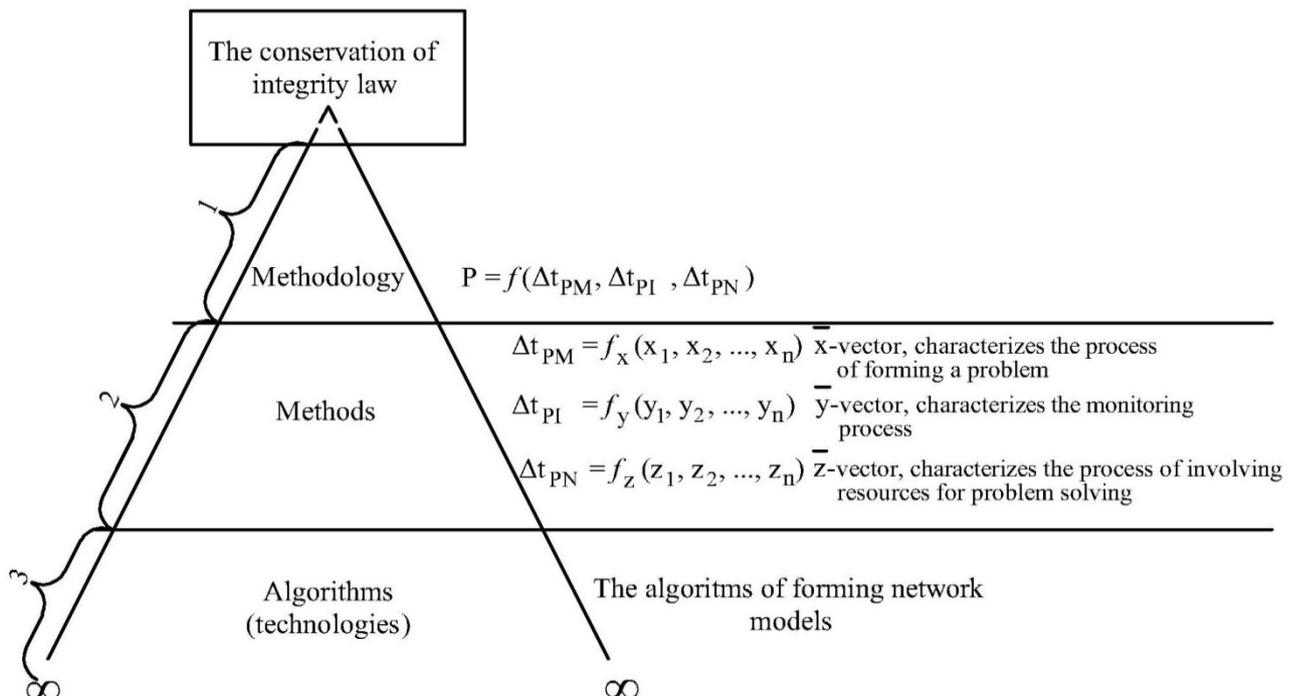


Figure 5. Scheme of the gnoseological meaning for the object integrity conservation law

The first level describes the abstract level of representation of the theory, which includes: basic concepts of the theory; basic dependencies of achieving a result by the system; basic logical rules of deployment of the theory.

The second level characterizes the abstract and specific level of representation of the theory's main concepts, which include (conditions of the required changes of the system's state, or conditions of the transition from one state to another on these sets); methods for validating the system's model; methods for validating the use of the system; methods for estimating the efficiency of the system's use.

The third level characterizes the particular level of representing the basic concepts of the theory, which include (the technology of required changes of the system's states, the conditions for transition implementation); possibilities of the system (economic, social, technical); system's operations (types, methods and forms); mechanisms of balancing the capabilities and system's operations in order to achieve the desired performance.

### *General Approach*

The integrity conservation law allows creating an adequate model of the process control, depending on varying socio-economic conditions, based on establishing a formal analytical dependence  $P = f(\Delta t_{PM}, \Delta t_{PI}, \Delta t_{PN})$  between the three basic components where  $\Delta t_{PM}$  is the average time of problem occurrence;  $\Delta t_{PI}$  is the average time of problem identification;  $\Delta t_{PN}$  is the average time of problem neutralization of a;  $P$  is an efficiency indicator for implementing administrative decisions [13].

The state referring to achieving a goal by the object of management is the main component in solving practical management problems. In real life conditions the manager can find himself in two situations:

- he is not ready for a particular situation;
- he is not ready to solve a problem in the management process, which will require additional time resources from him.

Taking into account these two basic situations in the model, it is necessary to distinguish four basic states:

The first state is the one when the management object is at the beginning of the process under consideration.

The second state is the one that characterizes the achievement of a management goal by the process (object).

In the management process there can occur standard situations that are characterized by proven schemes, and emergency situations characterized by a problem that arises in management (a situation in which your possibilities are not adequate to the current situation and you have to look for resources to solve a problem). Accordingly, there appears the third basic state of the system (process) characterized by the fact of the problem's manifestation – state 3 [13].

When the object (process) of management is in state 3, there appears the necessity of identifying the given problem. Naturally, the manager spends some time  $\Delta t_{PI}$  on the problem's identification. This stage stipulates readiness for involving additional resources to solve the problem. Consequently, during the solution analysis the managed system moves into state 4 where the manager understands what resources, and how, should be used to achieve the management goal. In this state there appear two variants of the management process development:

- the manager can solve the problem but it takes time, therefore he moves from state 4 into state 2, where the problem is solved.

There are two possible variants of the situation development in state 2:

- while solving the problem, the manager spends unacceptably too much time, which is equal to failing the target task in the management process. This is characterized by moving from state 2 into state 1;
- the time spent on the problem's solution is in acceptable limits, when the manager solves the management target task.

The situation of the system's moving back into the initial state characterizes the manager's talent to tackle a great number of problems. The frequency of transition from state 1 into state 2 ( $\zeta^+$ ) is equal to the value inverse to the average execution time of the target task, where ( $\zeta^-$ ) characterizes the degree of readiness of the organization to solve the target management tasks and the frequency characterizes the average number of the execution plan failure. The authors believe that the status of a construction organization is an indicator of successful implementation of production tasks [13].

The frequency of moving from state 4 into state 2 is the value  $\left( v_2 = \frac{1}{\Delta t_{PN}} \right)$ ,  $\Delta t_{PN}$  is the average time of problem neutralization. The level of competence to solve unknown tasks depends on the correlation  $v_2$ .

This logic of reasoning allows constructing the following graph (Fig. 6) [21].

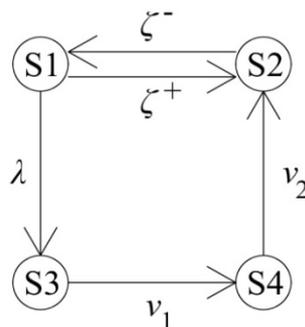


Figure 6. The state graph

The main assumptions and presumptions [13]:

- The information-management system (IMS) – the production management system – is under consideration.
- Time intervals between the moments of detecting the facts of problem manifestation are random values.
- The detected facts form a stream in time that is closely approximated to a Poisson arrival.
- The time for processing the data on a desired feature is a random value.
- The processes within the system data on the features are shared between the allocated forces and means, solving the corresponding target tasks in the production control.
- The instance is considered where the stay period the desired features (facts) in the sphere of production management system is extremely limited and comparable to the time that is necessary for them to be detected, as well as for data processing and adequate action taking according to these features.
- The system under discussion is meant to evaluate the potential opportunities of the production management system, depending on the situation.
- The manager is always prepared to solve this class of problems.
- The foundation of the status of a construction organization is an indicator of the successful implementation of production tasks.

### Main Correlations

While developing a management solution, different models are reviewed. Dynamic models are of particular interest. The paper [22] does not reveal the problem of dynamic models to the full extent, that is why it is necessary to make the Kolmogorov equation.

Against this background, the Kolmogorov differential equation system can be used [23, 24]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji}(t) \cdot P_j(t) - P_i(t) \cdot \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}(t), \quad (1)$$

where  $i = 0, 1, 2, \dots, n$

To make the Kolmogorov differential equation for the function  $P_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , the derivative  $\frac{dP_i(t)}{dt}$  of the function  $P_i(t) = P(S_i(t))$ ,  $P_i(t)$ , must be written in the left part of this equation, while in the right part of the equation there must be the product  $- \left( \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \right) \cdot P_i(t)$  of the sum  $\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}$  of transition probability densities  $\lambda_{ij}$  with the arrows coming out of the state  $S_i$ , by the probability  $P_i(t)$  of this state signed "minus", plus the sum  $\sum_{j=1}^n \lambda_{ji} \cdot P_j(t)$  of the products  $\lambda_{ji} \cdot P_j(t)$  of the transition probability densities  $\lambda_{ji}$ , corresponding to the arrows coming into the state  $S_i$ , by the probabilities of the states  $P_j(t)$ , where these arrows come out from. Herein the transition probability densities  $\lambda_{ij}$ , corresponding to the arrows absent on the graph, are equal to zero [23].

Final probabilities of states can be obtained by solving the system of linear algebraic equations that result from the Kolmogorov differential equations if derivatives are equal to zero and the probability functions of the states  $P_1(t), \dots, P_n(t)$  in the right parts of equations are changed correspondingly into the unknown final probabilities  $P_1, \dots, P_n$ . To find the exact value  $P_1, \dots, P_n$ , the normalizing condition  $P_0 + P_1 + \dots + P_n = 1$  is added to the equations.

Let us make the system of the Kolmogorov equations for the state graph in figure 6:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\zeta^+ + \lambda) \cdot P_1(t) + \zeta^- \cdot P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \zeta^+ \cdot P_1(t) - \zeta^- \cdot P_2(t) + v_2 \cdot P_4(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda \cdot P_1(t) - v_1 \cdot P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = v_1 \cdot P_3(t) - v_2 \cdot P_4(t). \end{cases} \quad (2)$$

Then the final probabilities can be obtained by solving the system of linear algebraic equations:

$$\begin{cases} 0 = -(\zeta^+ + \lambda) \cdot P_1 + \zeta^- \cdot P_2, \\ 0 = \zeta^+ \cdot P_1 - \zeta^- \cdot P_2 + v_2 \cdot P_4, \\ 0 = \lambda \cdot P_1 - v_1 \cdot P_3, \\ 1 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4. \end{cases} \quad (3)$$

The system solution is as follows:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot v_3 \cdot \zeta^-}{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_2 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_3 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot \zeta^- \cdot v_3 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^-} \\
 P_2 &= \frac{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot \zeta^+ \cdot v_3}{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_2 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_3 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot \zeta^- \cdot v_3 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^-} \\
 P_3 &= \frac{\lambda \cdot v_2 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_3 \cdot \zeta^-}{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_2 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_3 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot \zeta^- \cdot v_3 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^-} \\
 P_4 &= \frac{\lambda \cdot v_1 \cdot \zeta^-}{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_2 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_3 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot \zeta^- \cdot v_3 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^-}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

The probability that the problem will be identified and neutralized by the management system is determined by the following correlation:

$$P_2 = \frac{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot \zeta^+ \cdot v_3}{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_2 \cdot \zeta^- + \lambda \cdot v_3 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^+ + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^- + v_1 \cdot \zeta^- \cdot v_3 + v_1 \cdot v_2 \cdot \zeta^-}
 \tag{5}$$

The concept of maintaining the social system functioning based on feedback suggested by the authors (Fig. 4) and the mathematical model of an administrative decision make it possible to coordinate two processes: 1 - the monitoring process; 2 - the process of solving a problem. As a result of this coordination, the risk of failing a task by a construction organization is reduced. In addition, this technique makes it possible to assess the status of the construction organization. Let us consider an example.

### Results and Discussion

Let us consider a single-purpose network graph of constructing a secondary school for 300 students as a process (Fig. 7) [25, 26, 27, 28].

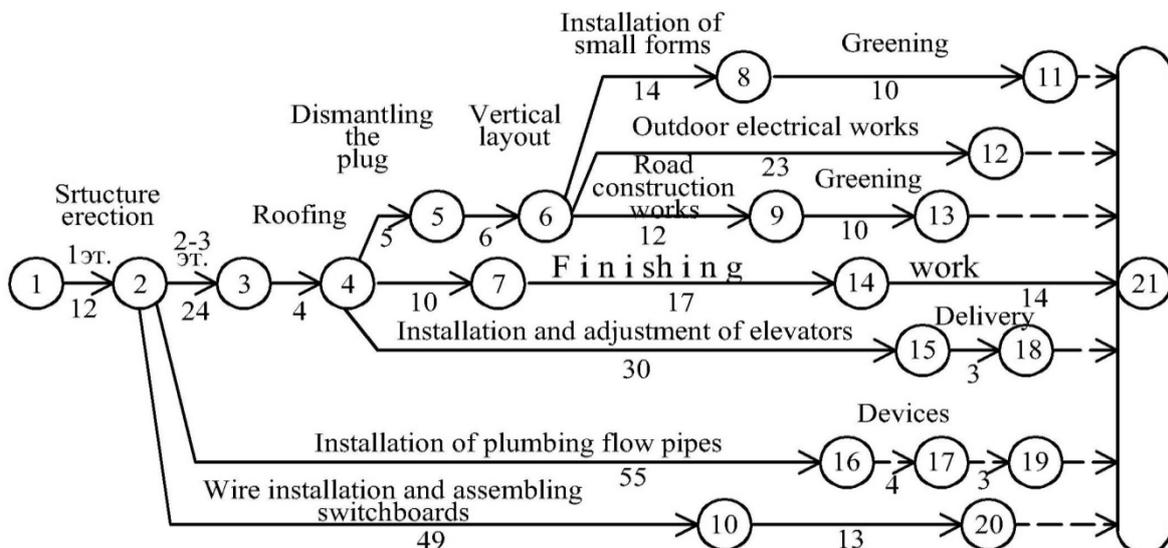


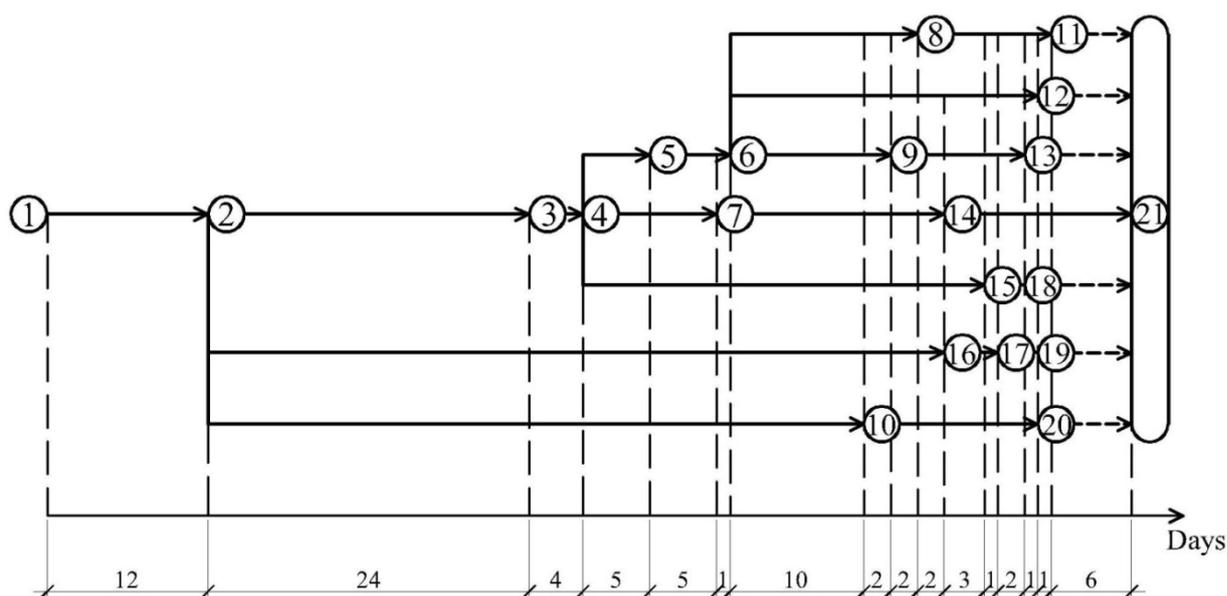
Figure 7. A single-purpose network graph of constructing a secondary school for 300 students

In every working process there appear problems (disturbances) that need to be promptly solved. Let us give the number of problems that may arise in this example:

Бурлов В.Г., Гробицкий А.М., Гробицкая А.М. Управление строительным производством с учетом показателя успешного выполнения производственного задания // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 77-91.

- Structure erection (event 1-2, 2-3) – 15 problems.
- Roofing (event 3-4) – 4 problems.
- Wire installation and assembling switchboards (event 2-10) – 6 problems.
- Installation of plumbing flow pipes (event 2-16) – 4 problems.
- Finishing work (event 4-7, 7-14, 14-21) – 6 problems.
- Dismantling the plug (event 4-5) – 2 problems.
- Installation and adjustment of elevators (event 4-15) – 8 problems.
- Vertical layout (event 5-6) – 5 problems.
- Installation of small forms (event 6-8) – 3 problems.
- Road construction works (event 6-9) – 10 problems.
- Greening (event 8-11, 9-13) – 5 problems.
- Outdoor electrical works (event 6-12) – 6 problems.
- Devices (event 6-17, 17-19) – 1 problem.

Let us divide the graph into time intervals so that the beginning of an interval - this is the end or the beginning of an event and all events that fall within this interval should be considered as a single period of time with the definite number of problems (Fig. 8).



**Figure 8. Breakdown of the network graph into intervals**

As a result of the breakdown 16 intervals are formed. Each interval has its duration. The total duration of the construction according to a network graph makes up  $T = 81$  days. We assume that in every job there appears a maximum number of problems at each interval. One working day is 8 hours (in further calculations let us convert days into hours, i.e.  $T = 81$  days = 648 hours.). Let us summarize in (Table 1) the results of breaking down the network graph.

**Table 1. Results of the breakdown of the network graph allowing for the number of problems**

Days	12	24	4	5	5	1	10	2	2	2	3	1	2	1	1	6
Hours	96	192	32	40	40	8	80	16	16	16	24	8	16	8	8	48
Number of problems, pcs.	15	25	14	26	29	29	43	37	32	29	26	19	19	18	11	6

In managing the building process three processes are considered regardless of the situation:

- The process of forming problems.
- The process of identifying problems.
- The process of problem solving.

In the construction process network diagrams are used. As a mathematical model of the administrative decision is lacking, network diagrams are impossible to join, they are joined at the verbal Burlov V.G., Grobitski A.M., Grobitskaya A.M. Construction management in terms of indicator of the successfully fulfilled production task. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 77–91. doi: 10.5862/MCE.63.5

level. This joining leads to the breakdown of a plan, and the “mathematical apparatus” suggested by the authors allowed building a mathematical model of the administrative decision and to link three most important processes in the organization of building on this basis. Due to this mathematical model a guarantee to achieve the implementation of the plan is provided.

Let us draw the network diagram of problem identification (Fig. 9) and the network of problem neutralization (Fig. 10).

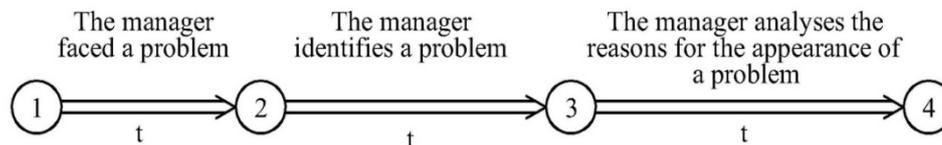


Figure 9. The network diagram of identifying a problem by the construction manager

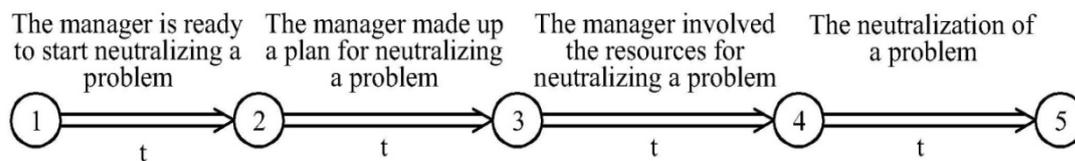


Figure 10. The network diagram of problem neutralization by the construction manager

For the graph in Figure 6 let us make up a system of algebraic equations of Kolmogorov. The system of Kolmogorov equations (2) for the graph of states in Figure 6:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\zeta^+ + \lambda) \cdot P_1(t) + \zeta^- \cdot P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \zeta^+ \cdot P_1(t) - \zeta^- \cdot P_2(t) + v_2 \cdot P_4(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda \cdot P_1(t) - v_1 \cdot P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = v_1 \cdot P_3(t) - v_2 \cdot P_4(t). \end{cases}$$

where  $\lambda$  is the frequency of problem manifestation;

$v_1$  – the frequency of the analysis of factors influencing the neutralization of a problem;

$v_2$  – the frequency of activities aimed to neutralize a problem;

$\zeta^+$  – the frequency of performance of the task plan;

$\zeta^-$  – the frequency of the average number of the failed plan execution.

The solution of the system with algebraic equations of Kolmogorov (2) is the expression (4).

The probability that the problem will be identified and neutralized by the management system is defined by the correlation (5).

The efficiency indicator of the model of the management process, depending on the varying socio-economic environment, will serve the analytical dependence:

$$P_2 = f(\lambda, v_1, v_2, \zeta^+, \zeta^-), \quad (6)$$

where  $\lambda$  – is the value  $\lambda = \left( \frac{1}{\Delta t_{PM}} \right)$ , where  $\Delta t_{PM}$  – is the average development time of a problem;

$v_1$  – is the value  $v_1 = \left( \frac{1}{\Delta t_{PI}} \right)$ , where  $\Delta t_{PI}$  – is the average identification time of a problem;

$v_2$  – is the value  $v_2 = \left( \frac{1}{\Delta t_{PN}} \right)$ , where  $\Delta t_{PN}$  – is the average neutralization time of a problem;

$\zeta^+$  – is the value  $\zeta^+ = \left( \frac{1}{T} \right)$ , where  $T$  – is the duration of solving a task;

$\zeta^-$  – the frequency of failure of the implementation of the plan task;

$P_2$  is the indicator of efficiency from the implementation of management decisions.

According to the example, we have:

$T = 648$  h.;  $N_p = 24$  – the average number of problems;

$$\Delta t_{PM} = 27 \Rightarrow \lambda = \left( \frac{1}{\Delta t_{PM}} \right) = \left( \frac{1}{27} \right) = 0.036.$$

$$\Delta t_{PI} = 3 \Rightarrow \lambda = \left( \frac{1}{\Delta t_{PI}} \right) = \left( \frac{1}{3} \right) = 0.365.$$

$$\Delta t_{PN} = 22 \Rightarrow \lambda = \left( \frac{1}{\Delta t_{PN}} \right) = \left( \frac{1}{22} \right) = 0.046.$$

$$T = 648 \Rightarrow \zeta^+ = \left( \frac{1}{T} \right) = \left( \frac{1}{648} \right) = 1.543 \cdot 10^{-3}.$$

Let us assume the conditions:

$$\Delta t_{PI} = \frac{\Delta t_{PM}}{8}; \quad \frac{\Delta t_{PI} + \Delta t_{PN}}{\Delta t_{PM}} < 1.$$

Let us substitute all the values in expression (5) and find the probability of solving the task  $P_2$  taking into account the frequency  $\left( \zeta^- \right)$ , which characterizes the average amount of failure in the plan execution, which underlies the status of a construction organization and shows success of the implementation of production tasks.

$$\text{If } \zeta^- = \frac{1}{50}, \text{ then } P_2 = 0.5.$$

$$\text{If } \zeta^- = \frac{1}{100}, \text{ then } P_2 = 0.667.$$

$$\text{If } \zeta^- = \frac{1}{150}, \text{ then } P_2 = 0.75.$$

$$\text{If } \zeta^- = \frac{1}{200}, \text{ then } P_2 = 0.8.$$

If  $\zeta^- = \frac{1}{250}$ , then  $P_2 = 0.833$ .

If  $\zeta^- = \frac{1}{300}$ , then  $P_2 = 0.857$ .

Calculations show that with increasing amounts of successfully implemented production tasks, the probability  $P_2$  increases, and consequently the status of the organization increases (Fig. 11).



**Figure 11. The graph showing the dependence of probability  $P_2$  (probability of task solving) on frequency  $\zeta^-$  (indicator of the status for a construction company)**

### Conclusions

1. The analysis showed that there are no mathematical models of management solutions in the known publications.

2. In the production process a manager has to deal with three processes: the process of forming a problem (certain inconsistencies), the process of identifying a problem (recognition of the situation) and the process of neutralizing a problem (implementing the solution).

3. Network diagrams of the construction industry are added up and verbally agreed on, because of the lacking mathematical model for a management solution. This methodological approach leads to the breakdown of the plan.

4. The mathematical tool suggested by the authors allowed constructing a mathematical model of the management solution, and hereby linking three most important processes in the construction organization. This mathematical model guarantees the implementation of the plan..

5. The methodological possibilities of the developed approach are confirmed by the numerical experiment. The example showed the dependence of the probability of the manufacturing task implementation –  $P_2$  on the frequency of breaking down the plan of implementing a production task by the organization under consideration  $\zeta^-$ . Therefore, a frequency like that should be viewed as a fundamental indicator of the status for a construction company. This indicator shows reliability and accuracy of performing the obligations by a construction company while constructing an object.

Бурлов В.Г., Гробицкий А.М., Гробицкая А.М. Управление строительным производством с учетом показателя успешного выполнения производственного задания // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 3(63). С. 77–91.

## References

## Литература

- Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall LTD. London, 1956. 432 p.
- Harrison E.F., Pelletier M.A. A typology of strategic choice. *Technological Forecasting and Social Change*. 1993. No. 44(3). Pp. 245-263.
- Harrison E.F. Interdisciplinary Models of Decision Making. *Management Decision*. 1993. No. 31(8). Pp. 27-33.
- Darvish M., Yasaei M., Saeedi A. Application of the graph theory and matrix methods to contractor ranking. *International Journal of Project Management*. 2009. Vol. 27. No. 6. Pp. 610-619.
- Hatash Z., Skitmore M. Contractor Selection Using Multicriteria Utility Theory: An Additive Model. *Building and Environment*. 1998. Vol. 33. No. 2. Pp. 105-115.
- Cheng E. W.L., Li H. Contractor selection using the analytic network process. *Construction Management and Economics*. 2004. Vol. 22. No. 10. Pp. 1021-1032.
- Chan A.P.C., Chan A.P.L. Key performance indicators for measuring construction success. *Benchmarking*. 2004. Vol. 11. No. 2. Pp. 203-221.
- Komov V.M., Korotkov A.A. Opredeleniye veroyatnosti sostoyaniy sistemy stroitel'nogo proizvodstva [Determining the probability of states of the construction production system]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015. No. 3 (50). Pp. 140-147. (rus)
- Golovan A.M., Klashanov F.K., Petrova S.N. K teoreticheskim osnovam postroyeniya modeli upravleniya v stroitelstve [To the theoretical basics of building up models of construction management]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2013. No. 5 (40). Pp. 208-212. (rus)
- Gulenko O.I. Razrabotka modeli upravleniya ustoychivym razvitiyem sotsialno-ekonomicheskoy sistemy [Construction of a model of management of sustainable development of a socio-economic system]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya ekonomika i pravo*. 2015. No. 6. Pp. 14-20. (rus)
- Klashanov F.K. Sostavleniye logiko-lingvisticheskoy modeli sistemy upravleniya stroitelstvom [Creation of the logical-linguistic model of the system of construction management]. *Nauchnoye obrazovaniye*. 2015. No. 14. Pp. 370-373. (rus)
- Galeyeva Ye.I. Innovatsionnyye tekhnologii v upravlenii sotsialno-ekonomicheskimi sistemami [Innovative technologies in the management of socio-economic systems]. *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 2008. No. 3. Pp. 68-73. (rus)
- Burlov V.G. *Osnovy modelirovaniya sotsialno-ekonomicheskikh i politicheskikh protsessov (Metodologiya. Metody)* [The fundamentals of modeling socioeconomic and political processes (Methodology. Methods)]. Saint-Petersburg: Fakultet kompleksnoy bezopasnosti SPbGPU, 2006. 270 p. (rus)
- Kalinin V.N., Reznikov B.A., Varakin Ye.I. *Teoriya sistem i optimal'nogo upravleniya. Chast 1. Osnovnyye ponyatiya, matematicheskiye modeli i metody analiza sistem* [Systems theory and optimal management. Part 1. Basic concepts, mathematical models and methods of systems analysis]. Saint-Petersburg: VIKI im. A.F. Mozhayskogo, 1979. 320 p. (rus)
- Goode H.H., Machol R.E. *System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1957. 551p.
- Arbib M.A. *Brains, Machines and Mathematics*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1964. 494 p.
- Kalman, R.E. *Topics in mathematical system theory*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1974. 358 p.
- Anokhin P.K. *Oчерки по физиологии функциональных систем*. М.: Медицина, 1975. 448 с.
- Burlov V.G., Grobitski A.M. Development of a model for social system management in the construction process taking into account manager's qualification // *Humanities&Science University Journal*. 2015. No. 15. Pp. 45-57.
- Burlov V.G. О концепции гарантированного управления устойчивым развитием арктической зоны на основе решения обратной задачи // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. 2015. №2(16). С. 99-111.
- Berge C. *Théorie des graphes et ses applications*. Dunod.
- Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall LTD. London, 1956. 432 p.
- Harrison E.F., Pelletier M.A. A typology of strategic choice // *Technological Forecasting and Social Change*. 1993. No. 44(3). Pp. 245-263.
- Harrison E.F. Interdisciplinary Models of Decision Making // *Management Decision*. 1993. No. 31(8). Pp. 27-33.
- Darvish M., Yasaei M., Saeedi A. Application of the graph theory and matrix methods to contractor ranking // *International Journal of Project Management*. 2009. Vol. 27. No. 6. Pp. 610-619.
- Hatash Z., Skitmore M. Contractor Selection Using Multicriteria Utility Theory: An Additive Model // *Building and Environment*. 1998. Vol. 33. No. 2. Pp. 105-115.
- Cheng E. W.L., Li H. Contractor selection using the analytic network process // *Construction Management and Economics*. 2004. Vol. 22. No. 10. Pp. 1021-1032.
- Chan A.P.C., Chan A.P.L. Key performance indicators for measuring construction success // *Benchmarking*. 2004. Vol. 11. No. 2. Pp. 203-221.
- Комов В.М., Коротков А.А. Определение вероятности состояний системы строительного производства // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. №3(50). С. 140-147.
- Головань А.М., Клашанов Ф.К., Петрова С.Н. К теоретическим основам построения модели управления в строительстве // *Вестник гражданских инженеров*. 2013. №5(40). С. 208-212.
- Гуленко О.И. Разработка модели управления устойчивым развитием социально-экономической системы // *Вестник Удмуртского университета. Серия экономика и право*. 2015. №6. С. 14-20.
- Клашанов Ф.К. Составление логико-лингвистической модели системы управления строительством // *Научное образование*. 2015. №14. С. 370-373.
- Галеева Е.И. Инновационные технологии в управлении социально-экономическими системами // *Проблемы современной экономики*. 2008. №3. С. 68-73.
- Бурлов В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Методология. Методы). СПб: Факультет комплексной безопасности СПбГПУ, 2006. 270 с.
- Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И. Теория систем и оптимального управления. Часть 1. Основные понятия, математические модели и методы анализа систем. СПб: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1979. 320 с.
- Goode H.H., Machol R.E. *System Engineering: An Introduction to the Design of Large-Scale Systems*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1957. 551p.
- Arbib M.A. *Brains, Machines and Mathematics*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1964. 494 p.
- Kalman, R.E. *Topics in mathematical system theory*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1974. 358 p.
- Анохин П.К. *Очерки по физиологии функциональных систем*. М.: Медицина, 1975. 448 с.
- Burlov V.G., Grobitski A.M. Development of a model for social system management in the construction process taking into account manager's qualification // *Humanities&Science University Journal*. 2015. No. 15. Pp. 45-57.
- Burlov V.G. О концепции гарантированного управления устойчивым развитием арктической зоны на основе решения обратной задачи // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. 2015. №2(16). С. 99-111.
- Berge C. *Théorie des graphes et ses applications*. Dunod.

Burlov V.G., Grobitski A.M., Grobitskaya A.M. Construction management in terms of indicator of the successfully fulfilled production task. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 77-91. doi: 10.5862/MCE.63.5

- Meditisina, 1975. 448 p. (rus)
19. Burlov V.G., Grobitski A.M. Development of a model for social system management in the construction process taking into account manager's qualification. *Humanities&Science University Journal*. 2015. No. 15. Pp. 45-57.
  20. Burlov V.G. O kontseptsii garantirovannogo upravleniya ustoychivym razvitiyem arkticheskoy zony na osnove resheniya obratnoy zadachi [About guaranteed management concept of sustainable development of the arctic zone on the basis of the inverse problem solution]. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo*. 2015. No. 2 (16). Pp. 99-111. (rus)
  21. Berge S. *Théorie des graphes et ses applications*. Dunod. Paris, 1958. 277 p.
  22. Burlov V.G., Volkov V.F. Method of consecutive expert estimates in control problems for the development of large-scale potentially dangerous systems. *Engineering Simulation*. 1994. Vol. 12. No. 1. Pp. 110-115.
  23. Kemperman J.H.B. *The Passage Problem for a Stationary Markov Chain*. University of Chicago Press. Chicago, 1961. 127 p.
  24. Bellman R.E. *Stability Theory of Differential Equations*. McGraw-Hill Book Co. New York, 1953. 166 p.
  25. Crowston W.B.S. *Decision Network Planning Models*. Carnegie-Mellon University. Pittsburgh, 1968. 457 p.
  26. Papadakis V.M., Lioukas S., Chambers D. Strategic decision-making processes: The role of management and context. *Strategic Management Journal*. 1998. Vol. 19. No. 2. Pp. 115-147.
  27. Lu M., Li H. Resource-activity critical-path method for construction planning. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2003. Vol. 129. No. 4. Pp. 412-420.
  28. Simpson III W.P., Patterson J.H. A multiple-tree search procedure for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. 1996. Vol. 89. No. 3. Pp. 525-542.
  - Paris, 1958. 277 p.
  22. Burlov V.G., Volkov V.F. Method of consecutive expert estimates in control problems for the development of large-scale potentially dangerous systems // *Engineering Simulation*. 1994. Vol. 12. No. 1. Pp. 110-115.
  23. Kemperman J.H.B. The passage problem for a stationary Markov chain. University of Chicago Press. Chicago, 1961. 127 p.
  24. Bellman R.E. Stability theory of differential equations. McGraw-Hill Book Co. New York, 1953. 166 p.
  25. Crowston W.B.S. Decision network planning models. Carnegie-Mellon University. Pittsburgh, 1968. 457 p.
  26. Papadakis V.M., Lioukas S., Chambers D. Strategic decision-making processes: The role of management and context // *Strategic Management Journal*. 1998. Vol. 19. No. 2. Pp. 115-147.
  27. Lu M., Li H. Resource-activity critical-path method for construction planning // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2003. Vol. 129. No. 4. Pp. 412-420.
  28. Simpson III W.P., Patterson J.H. A multiple-tree search procedure for the resource-constrained project scheduling problem // *European Journal of Operational Research*. 1996. Vol. 89. No. 3. Pp. 525-542.

Viacheslav Burlov,  
+7(911)1004101; burlovvg@mail.ru

Andrei Grobitski,  
+7(964)3318710; afcrf@mail.ru

Anna Grobitskaya,  
80298646873; a.grabitskaya@yandex.ru

Вячеслав Георгиевич Бурлов,  
+7(911)1004101; эл. почта: burlovvg@mail.ru

Андрей Матвеевич Гробицкий,  
+7(964)3318710; эл. почта: afcrf@mail.ru

Анна Матвеевна Гробицкая,  
80298646873;  
эл. почта: a.grabitskaya@yandex.ru

© Burlov V.G., Grobitski A.M., Grobitskaya A.M., 2016

## Требования к материалам, представляемым к публикации

Материалы принимаются только через систему электронной редакции журналов СПбГПУ. Авторам необходимо зарегистрироваться в системе (<http://journals.spbstu.ru/>) и подать статью через нее, предварительно ознакомившись с нижеприведенными требованиями и условиями опубликования. Публикация в журнале бесплатна для авторов.

### Этические нормы и авторские права

Подавая статью в журнал, автор соглашается на условия лицензионного договора, в частности, на то, что все статьи без исключения публикуются в открытом доступе на сайте журнала и в Научной электронной библиотеке России. Также автор подтверждает, что статья является оригинальной, ранее не опубликованной, содержит только проверенные и точные данные; любые данные, полученные не автором, имеют соответствующие ссылки на источник.

### Тематика и язык статей

В «Инженерно-строительном журнале» публикуются оригинальные, ранее не опубликованные статьи, содержащие полученные авторами новые научные результаты, по тематике «Строительство». Принимаются статьи только на английском языке. Метаданные (аннотация, ключевые слова, список литературы) подаются на двух языках.

№	Дата выхода	Срок подачи материалов
4(64)	24.10.2016	13.05.2016
5(65)	06.11.2016	03.06.2016
6(66)	21.11.2016	09.09.2016
7(67)	02.12.2016	14.10.2016
8(68)	30.12.2016	11.11.2016

### Структура и содержание статей

Структура статьи должна соответствовать стандарту IMRAD (Introduction, Methods, Results, and Discussion). Введение должно включать обзор литературы по теме, дискуссия (и/или заключение – Conclusions) – нумерованные выводы.

### Технические требования к статьям

Статьи подаются в формате docx (MS Word 2007–2013). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Все эти поля заполняются отдельно при подаче через электронную редакцию.

Рекомендуемый объем статей: от 15000 до 30000 знаков с пробелами. Таблицы выполняются средствами Word (не рисунками) и располагаются внутри текста статьи. Иллюстрации должны быть дополнительно представлены в отдельных графических файлах (один рисунок – один файл). Допустимые форматы: JPEG, TIFF, BMP. В текстовый файл иллюстрации также должны быть включены. Все обозначения на рисунках должны быть на латинице.

Список литературы на русском языке должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания. Порядковый номер в тексте заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. Также к статье прилагается список литературы на латинице, оформленный в соответствии с инструкцией по транслитерации списка литературы, размещенной на сайте издания.

### Аннотация к статье

В журнал подается расширенная аннотация на двух языках: русском и английском. Аннотация должна повторять структуру статьи: актуальность, цель, методика, результаты, выводы. Аннотация должна содержать от 100 до 250 слов.

**Подробные требования к статьям см. на сайте журнала:**

<http://www.engstroy.spbstu.ru/autors.html>



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Инженерно-строительный институт  
Центр дополнительных профессиональных программ

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,  
тел/факс: 552-94-60, [www.stroikursi.spbstu.ru](http://www.stroikursi.spbstu.ru),  
[stroikursi@mail.ru](mailto:stroikursi@mail.ru)

Приглашает специалистов проектных и строительных организаций,  
не имеющих базового профильного высшего образования  
на курсы профессиональной переподготовки (от 500 часов)  
по направлению «Строительство» по программам:

**П-01 «Промышленное и гражданское строительство»**

Программа включает учебные разделы:

- Основы строительного дела
- Инженерное оборудование зданий и сооружений
- Технология и контроль качества строительства
- Основы проектирования зданий и сооружений
- Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD
- Автоматизация сметного дела в строительстве
- Управление строительной организацией
- Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика

**П-02 «Экономика и управление в строительстве»**

Программа включает учебные разделы:

- Основы строительного дела
- Инженерное оборудование зданий и сооружений
- Технология и контроль качества строительства
- Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика
- Управление строительной организацией
- Экономика и ценообразование в строительстве
- Управление строительной организацией
- Организация, управление и планирование в строительстве
- Автоматизация сметного дела в строительстве

**П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»**

Программа включает учебные разделы:

- Основы механики жидкости и газа
- Инженерное оборудование зданий и сооружений
- Проектирование, монтаж и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования
- Проектирование, монтаж и эксплуатация систем отопления и теплоснабжения
- Проектирование, монтаж и эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения
- Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD
- Электроснабжение и электрооборудование объектов

**П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»**

Программа включает учебные разделы:

- Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем
- Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений
- Проектирование и расчет железобетонных конструкций
- Проектирование и расчет металлических конструкций
- Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD
- Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office

**П-05 «Контроль качества строительства»**

Программа включает учебные разделы:

- Основы строительного дела
- Инженерное оборудование зданий и сооружений
- Технология и контроль качества строительства
- Проектирование и расчет железобетонных конструкций
- Проектирование и расчет металлических конструкций
- Обследование строительных конструкций зданий и сооружений
- Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика

По окончании курса слушателю выдается диплом о профессиональной переподготовке  
установленного образца, дающий право на ведение профессиональной деятельности

