

№4 (14)
2023

Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-------|
| НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ Е.П. Ефимов, В.В. Лалин | 3-10 |
| УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ Б.О. Гапоненко, В.А. Тарасов | 11-20 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ ДЛИНЫ СТАЛЬНЫХ КОЛОНН В ПК ЛИРА САПР 2016R5 К.В. Парасюк, С.Ф. Дьяков | 21-33 |
| НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОФРО-БАЛОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРОВ ГОФРИРОВАНИЯ СТЕНКИ М.С. Захаркевич | 34-42 |
| МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МНОГОПРОФИЛЬНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ А.К. Княжищева | 43-51 |

CONTENTS

| | |
|--|-------|
| STRESS-STRAIN STATE OF STIFFENED SHELL E.P. Efimov, V.V. Lalin | 3-10 |
| ACCOUNTING THE CHARACTERISTICS OF VISCOUS DAMPERS IN SEISMIC CALCULATIONS OF MULTI-STOREY REINFORCED CONCRETE BUILDINGS B.O. Gaponenko, V.A. Tarasov | 11-20 |
| DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF THE CALCULATED LENGTH OF STEEL COLUMNS IN PC LIRA CAD 2016R5 K.V. Parasyuk, S.F. Dyakov | 21-33 |
| STRESS-STRAIN STATE OF CORRUGATED BEAMS DEPENDING ON THE SIZE OF THE WALL CORRUGATION M.S. Zaharkevich | 34-42 |
| METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN A MULTIDISCIPLINARY CONSTRUCTION ORGANIZATION A. K. Knyazhishcheva | 43-51 |

УДК 69.04

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРЕПЛЕННОЙ КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Е.П. Ефимов, В.В. Лалин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В настоящем исследовании проводится обзор методов определения напряженно-деформированного состояния подкрепленных конических оболочек, приведенных в действующих нормативных документах. С целью совершенствования описанных решений предлагается методика составления системы уравнений с использованием уравнений совместности перемещений и углов поворота. Результатом решения предложенной системы являются усилия и моменты, действующие в различных участках описываемой конструкции, с помощью которых в последствии находятся радиальные перемещения, углы поворотов шпангоутов, а также напряжения. Проводится численный эксперимент в программно-вычислительном комплексе Ansys Mechanical APDL путем моделирования подкрепленных поперечными ребрами конических оболочек различных углов конусности с целью определения достоверности значений радиальных перемещений, углов поворота и напряжений, полученных с использованием предлагаемой системы уравнений. Проводится сравнительный анализ полученных значений с результатами, вычисленными согласно действующим нормативным документам. Погрешность напряжений, полученных с использованием предложенного метода и численного эксперимента, не превышает 5%. Погрешность определения напряжений по описываемому методу не превышает, а местами превосходит значения, полученные при анализе согласно нормативной документации. Предложенная методика позволяет определять не только напряжения, но и значения радиальных перемещений и углов поворота шпангоутов, нахождение которых не описывается в действующих нормах.

Ключевые слова: коническая оболочка, подкрепленная оболочка, поперечные ребра, угол поворота шпангоута, радиальные перемещения, напряженно-деформированное состояние, балки на упругом основании.

Ссылка для цитирования: Ефимов Е.П., Лалин В.В. Напряженно-деформированное состояние подкрепленной конической оболочки // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 3-10. EDN: DYSCUA.

STRESS-STRAIN STATE OF STIFFENED SHELL

E.P. Efimov, V.V. Lalin

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The present study provides review of methods of determination stress-strain state of stiffened conical shells which can be found in actual normative documents. The method of generation of combined equations with the use of equations of strain compatibility is offered to develop reviewed solutions. The results of the offered combined equations are forces and moments that can be found in different parts of the construction and can provide radial displacements, angular deflections of ribs and stresses. Numerical experiment with the use of programming and computing suite Ansys Mechanical APDL is carried out to determine accuracy of values of radial displacements, angular deflections and stresses calculated with the use of offered combined equations. The experiment includes modeling of stiffened conical shells of various cone angles. Also there is comparative analysis of the calculated values with results evaluated according to actual normative documents. Accuracy of stresses determined with the use of the offered method compared to the experiment does not exceed 5%. Imprecision of determination of stresses with the help of the computing suite does not surmount values calculated according to normative acts and sometimes the offered method gives more accurate results. The provided method allows to find the values of radial displacements and angular deflection of bends which cannot be found with the use of actual normative documents.

Keywords: conical shell, stiffened shell, cross ribs, angular deflection of bend, radial displacement, beam on elastic foundation.

For citation: Efimov E.P., Lalin V.V. Stress-strain state of stiffened shell // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 3-10. EDN: DYSCUA.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день оболочки вращения нашли применение в различных областях промышленности [1, 2]. В связи с этим существует большое количество методов анализа этих конструкций. Наибольшее распространение в настоящее время получил анализ тонкостенных подкрепленных поперечными ребрами [3] конструкций с помощью метода конечных элементов, реализованного во многих программно-вычислительных комплексах, таких как Ansys Mechanical APDL. Однако в инженерной практике помимо выполнения расчета непосредственно в программном комплексе требуется верификация полученных результатов, необходимая для понимания корректности работы выполненной расчетной модели [4, 5]. Эта процедура проводится путем сравнения величин, полученных в результате численного расчета, с решениями известных дифференциальных уравнений. В частности, в качестве такого уравнения может быть принято дифференциальное уравнение балки-полоски на сплошном упругом основании. Этот метод, полученный еще в первой половине предыдущего столетия, отличается простой в практическом использовании [6].

В то же время стоит отметить малое количество научных работ, посвященных использованию описанного метода для расчета распространенных на практике [7] конических подкрепленных оболочек. В ряде работ [8], в которых встречается упоминание расчета описываемых конструкций методом балок-полосок, коническая оболочка рассчитывается по формулам, полученным для цилиндрической оболочки. В актуальных нормативных документах, таких как НД 2-020201-014 «Правила классификации и постройки обитаемых подводных аппаратов и судовых водолазных комплексов», используется аналогичный подход и искомыми величинами являются напряжения.

Общие мембранные напряжения в продольном сечении в середине шпации определяются по формуле (1):

$$\sigma_2^0 = k_2^0 \cdot \frac{p \cdot r}{s \cdot \sin\theta}, \quad (1)$$

где p – наружное давление, действующее на оболочку, кгс/см²;

r – радиус исследуемой точки конструкции, см;

s – толщина оболочки, см;

θ – угол между осью оболочки и нормалью, проведенной к исследуемой точке конструкции, рад.

Суммарные напряжения в поперечном сечении у шпангоута определяются по формуле (2):

$$\sigma_1^t = k_1 \cdot \frac{p \cdot r}{s \cdot \sin\theta}. \quad (2)$$

Напряжения в поперечном сечении шпангоутов определяются по формуле (3):

$$\sigma_{fr}^0 = \frac{k}{1 - \frac{Z_{fr}}{r}} \cdot \frac{p \cdot r}{s \cdot \sin\theta}, \quad (3)$$

где Z_{fr} – высота шпангоута от срединной поверхности оболочки до свободной кромки (в расчете принимается со своим знаком), см.

Коэффициенты k_2^0 , k_1 , k определяются как функции параметров u , β , которые находятся по формулам (4), (5):

$$u = 0,642 \cdot \frac{l}{\sqrt{r \cdot s \cdot \sin\theta}}, \quad (4)$$

где l – расстояние по оси между шпангоутами, см.

$$\beta = 0,642 \cdot \frac{l \cdot s \cdot \left(1 - \frac{Z_0}{r}\right)}{F \cdot \sin\theta}, \quad (5)$$

где Z_0 – отстояние центра тяжести шпангоута от срединной поверхности обшивки (в расчете принимается со своим знаком), см;

F – площадь поперечного сечения шпангоута, см²;

В ряде случаев при проектировании конических оболочек требуется также информация о радиальных перемещениях различных участков конструкции и углы поворотов шпангоутов, определение которых не приводится ни в нормах, ни в описанных научных работах. Определению радиальных перемещений посвящена работа [4]. Однако полученная формула не только не дает данных о значениях угла поворота ребра, но и не позволяет с принятой инженерной погрешностью оценить перемещения участков поверхности оболочек с углом конусности свыше 20 градусов.

В связи с вышеизложенными сведениями целью работы является разработка метод анализа напряженно-деформированного состояния конической оболочки.

Задачи исследования включают:

- Определение необходимого количества участков для разбиения расстояния между ребрами;
- Составление системы уравнений, включающей в себя уравнения равновесия в точках соединения ребер и оболочки и уравнения совместности радиальных перемещений и углов поворота различных участков оболочки и стенок шпангоутов;
- Создание конечно-элементной модели подкрепленной конической оболочки в ПК «Ansys».
- Определение напряженно-деформированного состояния исследуемых конструкций различных углов конусности с помощью аналитического и численного решения.
- Анализ полученных результатов.

МОДЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования принята усеченная коническая оболочка толщиной $s = 3$ см, подкрепленная ребрами таврового сечения (стенка $20 \times 1,5$ см, полка $2,5 \times 8$ см) с шагом $l = 50$ см и нагруженная всесторонним внешним гидростатическим давлением $p = 40$ кгс/см². В исследовании рассмотрены конические оболочки, подкрепленные внешними или внутренними поперечными ребрами, с углами конусности θ равными 10° , 20° , 40° .

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Система уравнений составляется из полученных в работах [9,10] решений дифференциальных уравнений. В [9] приводятся решения для балок-полосок конечной длины, находящихся под действием сосредоточенной силы, сосредоточенного момента и равномерно распределенной нагрузки. Также в работе [9] приводится выражение для получения перемещения кольца, находящегося под воздействием внешней распределенной нагрузки.

В работе [10] получено выражение, с помощью которого определяется угол поворота кольца, находящегося под воздействием крутящего момента.

Для определения необходимого количества участков, на которые должны быть разбита шпация, проведено исследование упрощенной схемы. Были рассмотрены варианты разбиения шпации на 1, 2, 3 и 4 участка. Упрощенная расчетная схема для исследования варианта разбиения на 2 участка представлена ниже (рис. 1).

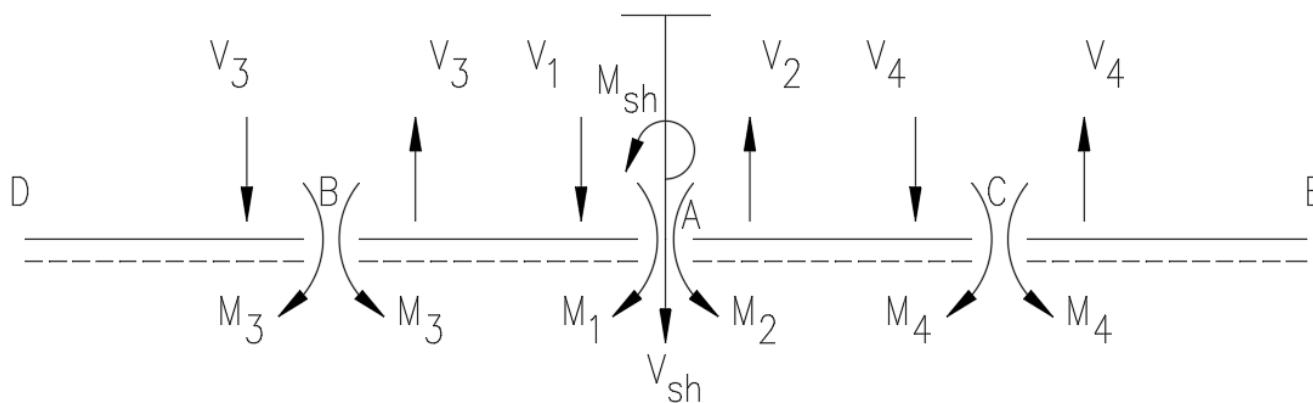


Рис. 1. Расчетная схема варианта разбиения шпации на 2 участка
Fig. 1. Design diagram of the variant of splitting the space into 2 sections

Уравнения совместности перемещений и углов поворота двух участков шпации, а также для участка шпации и шпангоута в точке А приведены в формулах (6-10) соответственно.

$$\frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{AB} \cdot u_{AB}^4 \cdot \varphi_{2AB}} \cdot V_1 + \frac{q}{k_{AB}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot M_1 + \frac{l^3 \cdot \lambda_{0AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_3 - \frac{l^2 \cdot \rho_{1AB}}{2 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot M_3 =$$

$$= - \frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{AC} \cdot u_{AC}^4 \cdot \varphi_{2AC}} \cdot V_2 + \frac{q}{k_{AC}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AC}}{8 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot M_2 - \frac{l^3 \cdot \lambda_{0AC}}{8 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot V_4 - \frac{l^2 \cdot \rho_{1AC}}{2 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot M_4,$$

$$\frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{AB} \cdot u_{AB}^4 \cdot \varphi_{2AB}} \cdot V_1 + \frac{q}{k_{AB}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot M_1 + \frac{l^3 \cdot \lambda_{0AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_3 - \frac{l^2 \cdot \rho_{1AB}}{2 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot M_3 = \frac{V_{sp} \cdot r \cdot (r + Z_0)}{E \cdot F \cdot \sin \theta} \quad (7)$$

$$\frac{l^2 \cdot \lambda_{2AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_1 + \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{AB} \cdot u_{AB}^4 \cdot \eta_{1AB}} \cdot M_1 + \frac{l^2 \cdot \rho_{1AB}}{2 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_3 - \frac{l \cdot \rho_{2AB}}{E \cdot I_{AB}} \cdot M_3 = \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AC}}{8 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot V_2 - \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{AC} \cdot u_{AC}^4 \cdot \eta_{1AC}} \cdot M_2 + \frac{l^2 \cdot \rho_{1AC}}{2 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot V_4 + \frac{l \cdot \rho_{2AC}}{E \cdot I_{AC}} \cdot M_4 \quad (8)$$

$$\frac{l^2 \cdot \lambda_{2AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_1 + \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{AB} \cdot u_{AB}^4 \cdot \eta_{1AB}} \cdot M_1 + \frac{l^2 \cdot \rho_{1AB}}{2 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_3 - \frac{l \cdot \rho_{2AB}}{E \cdot I_{AB}} \cdot M_3 = -\frac{M_{sp} \cdot r \cdot (r + Z_0)}{E \cdot I_{sp}} \quad (9)$$

где E – модуль деформации, $E = 2100000$ кгс/см²;

$q = 0,85p$;

$k, I, \varphi_2, \lambda_2, \lambda_0, \rho_1, \eta_1, \rho_2$ – параметры, определяемые по формулам (7-12) и зависящие от параметров рассматриваемого участка.

$$k = \frac{E \cdot s \cdot \sin^2 \theta}{r^2} \quad (10)$$

$$I = \frac{s^3 \cdot r^2}{10,906} \quad (11)$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\cosh(4u) + \cos(4u) - 2}{\sinh(4u) - \sin(4u)} \right) \quad (12)$$

$$\lambda_2 = \frac{\cosh(4u) - \cos(4u)}{u^2 \cdot (\cosh(4u) + \cos(4u) - 2)} \quad (13)$$

$$\lambda_0 = \frac{\cosh(2u) \cdot \sin(2u) - \sinh(2u) \cdot \cos(2u)}{u^3 \cdot (\cosh(4u) + \cos(4u) - 2)} \quad (14)$$

$$\rho_1 = \frac{\sinh(2u) \cdot \sin(2u)}{u^2 \cdot (\cosh(4u) + \cos(4u) - 2)} \quad (15)$$

$$\eta_1 = \frac{3}{8 \cdot u^3} \cdot \left(\frac{\cosh(4u) + \cos(4u) - 2}{\sinh(4u) + \sin(4u)} \right) \quad (16)$$

$$\rho_2 = \frac{\cosh(2u) \cdot \sin(2u) + \sinh(2u) \cdot \cos(2u)}{u \cdot (\cosh(4u) + \cos(4u) - 2)} \quad (17)$$

Уравнения совместности перемещений и углов поворота в точке В для двух участков шпации (18-19) соответственно.

$$\frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{DB} \cdot u_{DB}^4 \cdot \varphi_{2DB}} \cdot V_3 + \frac{q}{k_{DB}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2DB}}{8 \cdot E \cdot I_{DB}} \cdot M_3 = -\frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{AB} \cdot u_{AB}^4 \cdot \varphi_{2AB}} \cdot V_3 + \frac{q}{k_{AB}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot M_3 - \frac{l^3 \cdot \lambda_{0AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_1 - \frac{l^2 \cdot \rho_{1AB}}{2 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot M_1, \quad (18)$$

$$\frac{l^2 \cdot \lambda_{2DB}}{8 \cdot E \cdot I_{DB}} \cdot V_3 + \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{DB} \cdot u_{DB}^4 \cdot \eta_{1DB}} \cdot M_3 = \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AB}}{8 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_3 - \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{AB} \cdot u_{AB}^4 \cdot \eta_{1AB}} \cdot M_3 + \frac{l^2 \cdot \rho_{1AB}}{2 \cdot E \cdot I_{AB}} \cdot V_1 + \frac{l \cdot \rho_{2AB}}{E \cdot I_{AB}} \cdot M_1 \quad (19)$$

Уравнения совместности перемещений и углов поворота в точке С для двух участков шпации (20-21) соответственно.

$$\frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{AC} \cdot u_{AC}^4 \cdot \varphi_{2AC}} \cdot V_4 + \frac{q}{k_{AC}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2AC}}{8 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot M_4 + \frac{l^3 \cdot \lambda_{0AC}}{8 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot V_2 - \frac{l^2 \cdot \rho_{1AC}}{2 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot M_2 = -\frac{l^3}{16 \cdot E \cdot I_{CE} \cdot u_{CE}^4 \cdot \varphi_{2CE}} \cdot V_4 + \frac{q}{k_{CE}} + \frac{l^2 \cdot \lambda_{2CE}}{8 \cdot E \cdot I_{CE}} \cdot M_4, \quad (20)$$

$$\frac{l^2 \cdot \lambda_{2AC}}{8 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot V_4 + \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{AC} \cdot u_{AC}^4 \cdot \eta_{1AC}} \cdot M_4 + \frac{l^2 \cdot \rho_{1AC}}{2 \cdot E \cdot I_{AC}} \cdot V_2 - \frac{l \cdot \rho_{2AC}}{E \cdot I_{AC}} \cdot M_2 = \frac{l^2 \cdot \lambda_{2CE}}{8 \cdot E \cdot I_{CE}} \cdot V_4 - \frac{3 \cdot l}{16 \cdot E \cdot I_{CE} \cdot u_{CE}^4 \cdot \eta_{1CE}} \cdot M_4 \quad (21)$$

Уравнения равновесия узла в точке А для перерезывающих усилий и моментов представлены ниже в формулах (22-23) соответственно.

$$V_1 + V_{sp} \cdot \sin \theta - V_2 = 0 \quad (22)$$

$$M_1 - M_2 - M_{sp} = 0 \quad (23)$$

На основании приведенных выше уравнений были составлены системы, с помощью которых были найдены возникающие в выделенных точках силы и моменты. Найденные величины были использованы для определения напряжений, радиальных перемещений и углов поворота.

Результаты, полученные при расчете описанной схемы с разным количеством участков в пределах шпации, сравниваются с значениями, полученными в программном комплексе Ansys Mechanical APDL. Для сравнения с численным экспериментом была создана конечно-элементная модель, представленная ниже (рис. 2). Для уменьшения расчетной схемы была задана половина конической оболочки, закрепленная в сечении в конической системе координат по U_y , ROT_x , ROT_z . По линии стыка оболочки и шпангоута введены закрепления по U_x .

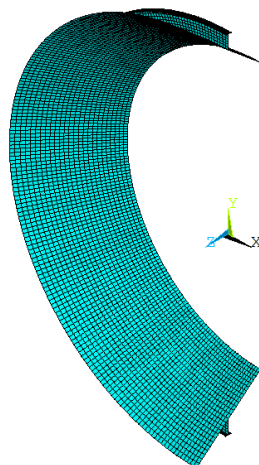


Рис. 2. Конечно-элементная модель для исследования необходимой степени разбиения шпации
Fig. 2. Finite-element model for the study of the required degree of spatula division

Результаты сравнения величин, полученных аналитическим путем и при помощи численного эксперимента, для разных углов конусности и разной ориентации шпангоутов для наглядности сведены в таблицу (табл. 1). В столбце «%» для каждого варианта разбиения шпации приводится разница между ответами, полученными с помощью аналитического и численного решений. Значения σ_1^1 и σ_{01}^1 описывают значения суммарных продольных напряжений слева и справа от шпангоута соответственно.

Таблица 1. Сравнение результатов аналитического расчета различных вариантов разбиения шпации и результатов численного моделирования

Table 1. Comparison of results of analytical calculation of different variants of division of space and results of numerical modeling

| θ | Пар. | Аналитическое решение | | | | | | | | Численное решение |
|---------------------|-----------------|-----------------------|------|------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------------|
| | | 1 уч. | % | 2 уч. | % | 3 уч. | % | 4 уч. | % | |
| 10° Внеш. шп. | w | 0,247816 | 0,90 | 0,247873 | 0,87 | 0,247878 | 0,87 | 0,247875 | 0,87 | 0,250035 |
| | θ | 0,000478698 | 22,4 | 0,00043700 | 11,8 | 0,000434391 | 11,1 | 0,000431301 | 10,3 | 0,00039097 |
| | σ_1^1 | 3133,475 | 0,94 | 3133,333 | 0,93 | 3133,684 | 0,94 | 3134,692 | 0,98 | 3104,38 |
| | σ_{01}^1 | 3132,337 | 1,69 | 3132,293 | 1,69 | 3132,65 | 1,70 | 3133,666 | 1,73 | 3080,3 |
| | σ_{sp} | 1931,396 | 1,43 | 1931,837 | 1,45 | 1931,878 | 1,46 | 1931,85 | 1,45 | 1904,165 |
| 10° Внут. шп. | w | 0,238838 | 1,32 | 0,238891 | 1,34 | 0,238895 | 1,34 | 0,238891 | 1,34 | 0,235737 |
| | θ | 0,000471252 | 22,2 | 0,00043234 | 12,1 | 0,00042987 | 11,5 | 0,000426573 | 10,6 | 0,00038566 |
| | σ_1^1 | 3263,819 | 1,40 | 3263,718 | 1,40 | 3264,093 | 1,39 | 3265,183 | 1,36 | 3309,52 |
| | σ_{01}^1 | 3262,551 | 0,59 | 3262,555 | 0,59 | 3262,937 | 0,58 | 3264,035 | 0,54 | 3281,82 |
| | σ_{sp} | 2105,066 | 0,98 | 2105,529 | 0,96 | 2105,567 | 0,95 | 2105,53 | 0,96 | 2125,66 |
| 20° Внеш. шп. | w | 0,273963 | 0,99 | 0,274227 | 0,89 | 0,274277 | 0,88 | 0,274286 | 0,87 | 0,276677 |
| | θ | 0,00106168 | 25,6 | 0,00094953 | 12,3 | 0,000941917 | 11,4 | 0,000937927 | 10,9 | 0,00084540 |
| | σ_1^1 | 3261,019 | 0,56 | 3260,368 | 0,54 | 3261,016 | 0,56 | 3262,208 | 0,59 | 3242,95 |
| | σ_{01}^1 | 3258,493 | 2,06 | 3258,109 | 2,05 | 3258,776 | 2,07 | 3259,849 | 2,11 | 3192,63 |
| | σ_{sp} | 2037,048 | 1,34 | 2039,007 | 1,44 | 2039,383 | 1,46 | 2039,444 | 1,46 | 2010,095 |

| θ | Пар. | Аналитическое решение | | | | | | | | Численное решение |
|---------------------|-----------------|-----------------------|------|------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------------|
| | | 1 уч. | % | 2 уч. | % | 3 уч. | % | 4 уч. | % | |
| 20° Внут. шп. | w | 0,264195 | 1,19 | 0,26444 | 1,28 | 0,264487 | 1,30 | 0,264494 | 1,30 | 0,261091 |
| | θ | 0,001045168 | 25,4 | 0,00093928 | 12,7 | 0,000932062 | 11,8 | 0,000927945 | 11,3 | 0,00083369 |
| | σ_1^1 | 3396,524 | 1,82 | 3396,606 | 1,81 | 3396,752 | 1,81 | 3397,891 | 1,78 | 3458,25 |
| | σ_1^{01} | 3393,711 | 0,19 | 3393,533 | 0,20 | 3394,243 | 0,18 | 3395,393 | 0,14 | 3400,29 |
| | σ_{sp} | 2222,268 | 1,11 | 2224,326 | 1,02 | 2224,727 | 1,00 | 2224,783 | 1,00 | 2246,975 |
| 40° Внеш. шп. | w | 0,42287 | 1,47 | 0,424905 | 0,99 | 0,425317 | 0,89 | 0,425428 | 0,86 | 0,429094 |
| | θ | 0,003361008 | 40,6 | 0,00274108 | 14,7 | 0,002685881 | 12,4 | 0,002670045 | 11,7 | 0,00239034 |
| | σ_1^1 | 3894,601 | 0,27 | 3887,143 | 0,47 | 3889,879 | 0,39 | 3891,569 | 0,35 | 3905,23 |
| | σ_1^{01} | 3886,605 | 2,65 | 3880,621 | 2,49 | 3883,489 | 2,57 | 3885,216 | 2,61 | 3786,24 |
| | σ_{sp} | 2561,26 | 0,89 | 2573,582 | 1,38 | 2576,078 | 1,48 | 2576,752 | 1,50 | 2538,63 |
| 40° Внут. шп. | w | 0,40881 | 0,59 | 0,410703 | 1,05 | 0,411095 | 1,15 | 0,411198 | 1,17 | 0,406427 |
| | θ | 0,003309424 | 40,5 | 0,00271012 | 15,1 | 0,00265647 | 12,8 | 0,002640874 | 12,1 | 0,0023549 |
| | σ_1^1 | 4055,248 | 2,77 | 4048,929 | 2,93 | 4051,873 | 2,85 | 4053,631 | 2,81 | 4167,5 |
| | σ_1^{01} | 4046,326 | 0,42 | 4041,622 | 0,30 | 4044,711 | 0,38 | 4046,511 | 0,42 | 4029,51 |
| | σ_{sp} | 2805,663 | 1,75 | 2818,655 | 1,28 | 2821,347 | 1,19 | 2822,056 | 1,16 | 2854,86 |

Таким образом видно, что для обеспечения точности в 3-5% по напряжениям и перемещениям, а также для удобства дальнейшего анализа целесообразно принять разбиение шпации на 2 участка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа был выбран фрагмент подкрепленной конической оболочки, расчетная схема которого представлена ниже (рис. 3). В точках F и G по условиям симметрии отсутствуют перерезывающие силы, а углы поворота равны 0. С помощью описанного выше метода была составлена система уравнений для определения напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции.

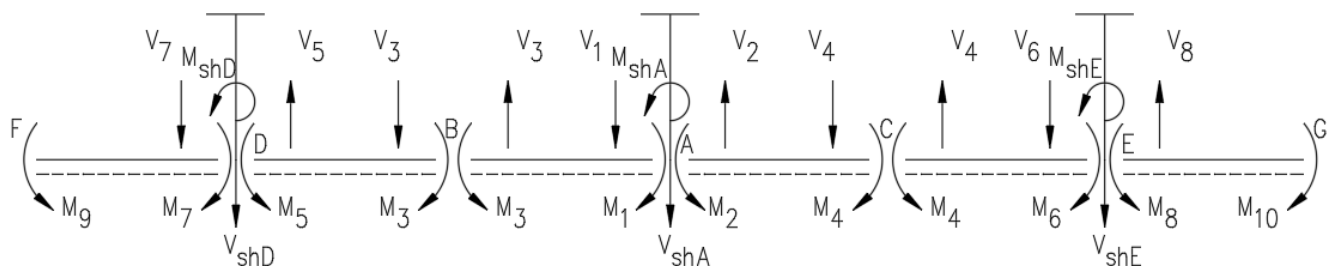


Рис. 3. Расчетная схема варианта разбиения шпации на 2 участка
 Fig. 3. Design diagram of the variant of splitting the space into 2 sections

Полученные значения напряжений в различных точках были сопоставлены со значениями, найденными при помощи численного моделирования, а также нормативных документов по формулам (1-5). В качестве примера вычисленных значений ниже приведены напряжения для оболочки с наибольшим углом конусности 40° при различной ориентации шпангоутов (табл. 2).

Таблица 2. Напряжения в различных точках подкрепленных конических оболочек с углом конусности 40°.
 Table 2. Stresses at various points of reinforced conical shells with a taper angle of 40°.

| Параметры | Внешние шпангоуты | | | Внутренние шпангоуты | | |
|-----------------|-------------------|----------|-----------|----------------------|----------|-----------|
| | Метод расчета | | | Метод расчета | | |
| | По нормам | Аналит. | Численный | По нормам | Аналит. | Численный |
| σ_1^{BA} | 3604,89 | 3632,337 | 3653,21 | 3758,71 | 3773,146 | 3882,45 |
| σ_1^{AC} | 3604,89 | 3626,355 | 3532,45 | 3758,71 | 3766,497 | 3742,09 |
| σ_1^{FD} | 4025,45 | 3891,195 | 3973,37 | 4163,04 | 4018,827 | 4183,49 |
| σ_1^{DB} | 4025,45 | 3887,097 | 3849,48 | 4163,04 | 4014,347 | 4042,35 |
| σ_1^{CE} | 3159,71 | 3263,982 | 3227,67 | 3332,5 | 3419,751 | 3479,88 |
| σ_1^{EG} | 3159,71 | 3257,66 | 3111,46 | 3332,5 | 3412,58 | 3341,12 |
| σ_{spA} | 2627,14 | 2635,95 | 2596,84 | 2909,877 | 2893,63 | 2930,855 |

| Параметры | Внешние шпангоуты | | | Внутренние шпангоуты | | |
|-----------------|-------------------|---------|-----------|----------------------|---------|-----------|
| | Метод расчета | | | Метод расчета | | |
| | По нормам | Аналит. | Численный | По нормам | Аналит. | Численный |
| σ_{spD} | 3127,483 | 3147,57 | 3117,085 | 3417,32 | 3412,57 | 3463,15 |
| σ_{spE} | 2125,934 | 2120,4 | 2080,645 | 2398,221 | 2367,07 | 2398,025 |
| σ_{2B}^0 | 4087,02 | 4025,55 | 4115,01 | 4024,322 | 3970,21 | 4024,74 |
| σ_{2C}^0 | 3508,32 | 3560,57 | 3528,86 | 3452,409 | 3507,15 | 3450,0 |

Сравнение величин радиальных перемещений и углов поворота шпангоутов, полученных при помощи аналитического решения и численного моделирования для оболочек различных углов конусности с внешней или внутренней ориентацией ребер, представлено ниже (табл. 3).

Таблица 3. Сравнение радиальных перемещений и углов поворота для оболочек различной конусности, полученных с помощью аналитического решения и численного моделирования
Table 3. Comparison of radial displacements and rotation angles for shells of different taper obtained by analytical solution and numerical modeling

| Угол конус. | Метод расчета | Параметры | | | | | | | |
|-------------------|---------------|-----------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|
| | | w_A | w_B | w_C | w_D | w_E | θ_D | θ_A | θ_E |
| 10° (Внеш.шп.) | Аналит. | 0,25282 | 0,28736 | 0,26779 | 0,27166 | 0,23459 | 0,00039186 | 0,00031052 | 0,00029733 |
| | Числен. | 0,25492 | 0,28967 | 0,27031 | 0,27406 | 0,23644 | 0,00032406 | 0,00028653 | 0,00027744 |
| Погрешность: | | 0,83 | 0,81 | 0,94 | 0,88 | 0,79 | 20,92 | 8,37 | 7,17 |
| 10° (Внут.шп.) | Аналит. | 0,24409 | 0,28073 | 0,26151 | 0,26265 | 0,22615 | 0,00038360 | 0,00030354 | 0,00029015 |
| | Числен. | 0,24103 | 0,27924 | 0,26046 | 0,25969 | 0,22303 | 0,00031053 | 0,00027531 | 0,00026612 |
| Погрешность: | | 1,27 | 0,53 | 0,4 | 1,14 | 1,4 | 23,53 | 10,25 | 9,03 |
| 20° (Внеш.шп.) | Аналит. | 0,28010 | 0,33144 | 0,28669 | 0,32405 | 0,23911 | 0,00085520 | 0,00070376 | 0,00064258 |
| | Числен. | 0,28243 | 0,33349 | 0,28919 | 0,32708 | 0,24092 | 0,00071125 | 0,00064926 | 0,00060590 |
| Погрешность: | | 0,83 | 0,62 | 0,87 | 0,93 | 0,76 | 20,24 | 8,39 | 6,05 |
| 20° (Внут.шп.) | Аналит. | 0,27063 | 0,32423 | 0,28026 | 0,31396 | 0,23027 | 0,00083749 | 0,00068884 | 0,00062684 |
| | Числен. | 0,26734 | 0,32213 | 0,27912 | 0,31094 | 0,22689 | 0,00068276 | 0,00062537 | 0,00058175 |
| Погрешность: | | 1,23 | 0,65 | 0,41 | 0,97 | 1,49 | 22,66 | 10,15 | 7,75 |
| 40° (Внеш.шп.) | Аналит. | 0,43520 | 0,57227 | 0,41153 | 0,60176 | 0,29478 | 0,00251426 | 0,00232889 | 0,00186170 |
| | Числен. | 0,43893 | 0,57195 | 0,41781 | 0,60810 | 0,29747 | 0,00213726 | 0,00216640 | 0,00179509 |
| Погрешность: | | 0,86 | 0,06 | 1,52 | 1,05 | 0,91 | 17,64 | 7,5 | 3,71 |
| 40° (Внут.шп.) | Аналит. | 0,42163 | 0,56260 | 0,40435 | 0,58624 | 0,28317 | 0,00246638 | 0,00228790 | 0,00181744 |
| | Числен. | 0,41725 | 0,55671 | 0,40650 | 0,58313 | 0,27907 | 0,00206718 | 0,00210331 | 0,00173518 |
| Погрешность: | | 1,05 | 1,06 | 0,53 | 0,53 | 1,47 | 19,31 | 8,78 | 4,74 |

ОБСУЖДЕНИЕ

Напряжения, получаемые при помощи предложенного метода, хорошо сходятся с результатами расчета согласно нормативным документам и численному моделированию. Об этом свидетельствует то, что разница между сравниваемыми величинами не превышает инженерную погрешность 3%.

Полученные результаты показывают, что перемещения, полученные при использовании предложенного аналитического решения, сходятся в пределах 1,5% со значениями, вычисленными с помощью численного моделирования. Таким образом, предложенный метод анализа радиальных перемещений конической оболочки превосходит по точности методику, предложенную в работе [5].

Разница между углами поворота, определенными с помощью двух описанных способов, зависит от местоположения анализируемого ребра и в худшем случае составляет 23,5% в безопасную сторону. Наблюдаемое расхождение углов поворота может быть вызвано их малой величиной по сравнению с остальными величинами, определяемыми из составленной системы уравнений. Однако стоит отметить гораздо меньшую разницу углов поворота для крайних шпангоутов при наибольшем угле конусности и, следовательно, наибольшей величине завала шпангоутов. Эта разница для ребер в точке D не превышает 9%, а в точке E – 5%.

ВЫВОДЫ

1. Определены не только основные напряжения, действующие в частях исследуемых конструкций, но и радиальные перемещения, методика вычисления которых не приводится в действующих нормативных документах.

2. Получены величины суммарных продольных напряжений, действующих с разных сторон от ребра. В то время как методика, описанная в нормативной документации, предлагает эти величины считать равными.

3. Проведена оценка величин углов поворота подкрепляющих поперечных ребер.

Сравнение численного эксперимента и расчета по предложенной методике показало, что аналитическое решение позволяет с хорошей точностью (не более 3%) определять значения напряжений и перемещений, однако результаты определения углов поворота поперечных ребер сходятся неудовлетворительно (23,5%), что свидетельствует о необходимости доработки предложенной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qu Y, Chen Y, Long X, Hua H, Meng G. A modified variational approach for vibration analysis of ringstiffened conical-cylindrical shell combinations // *European Journal of Mechanics A/Solid*. Т. 37. 2013. С. 200–215.
2. Кривошапко С.Н. К вопросу о применении параболических оболочек вращения в строительстве в 2000-2017 годах // *Строит. механика инженерных конструкций и сооружений*. 2017. №4. С. 4–14. EDN ZHAIXB.
3. Filippov S.B. Buckling of circular ring joint with cylindrical shell // *Shell Structures Theory and Applications, Proc. of the 9th SSTA Conference*. Poland: Jurata. 2010. С. 109–112. EDN UEIENB.
4. Жестков К.Г., Конкин А.М., Красавцев В.Н. К расчету напряженно-деформированного состояния оболочек малого диаметра в составе жестких связей основных корпусов подводных технических средств // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2018. Специальный выпуск 2. С. 64–68. EDN YQZQJV.
5. Ефимов Е.П., Лалин В.В. Определение вертикального перемещения в месте соединения шпангоута и конической оболочки // *Неделя науки ИСИ : Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 03–09 апреля 2023 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого"*, 2023. С. 421423. EDN KWPHNQ.
6. Лимаренко А.М., Сурьянинов Н.Г. Расчет цилиндрических оболочек методом граничных элементов // *Труды Одесского политехнического университета*. 2008. №2. С. 27–35. EDN NUNJTF.
7. Tian L., Ye T., Jin G. Vibration analysis of combined conical-cylindrical shells based on the dynamic stiffness method // *ThinWalled Structures*. 2021. №. 159. С. 107–260.
8. Папкович П.Ф. *Строительная механика корабля*. Ч. 1 Т. 2. Москва: Морской транспорт. 1947. 816 с.
9. Бойцов Г. В., Палий О. М., Постнов В. А., Чувиковский В. С. *Справочник по строительной механике корабля*. Т. 1. Ленинград: Судостроение. 1982. 376 с.
10. Тимошенко С.П. *Сопротивление материалов. Более сложные вопросы теории и задачи*. Т. 2. Москва: Наука. 1965. 480 с.

ОБ АВТОРАХ

Ефимов Евгений Павлович – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Email: Efimov.ep@edu.spbstu.ru

Владимир Владимирович Лалин – д.т.н., профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Email: lalin_vv@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Evgenii P. Efimov – graduate student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. Email: Efimov.ep@edu.spbstu.ru

Vladimir V. Lalin – professor of department «Higher School of Industrial, Civil and Road Engineering». Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. Email: lalin_vv@spbstu.ru

УДК 699.841

УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ

Б.О. Гапоненко, В.А. Тарасов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Одним из способов повышения сейсмостойкости зданий и сооружений является устройство сейсмоизоляции. Пружинно-демпферная сейсмоизоляция включает в себя пружинные блоки, обычно моделирующиеся в расчетной схеме в виде линейно-упругих пружин, и демпферы, для учета которых используют конечные элементы с постоянной величиной затухания. В действительности вискодемпферы не являются идеально вязкими и требуют учета зависимости параметров жесткости и демпфирования от частоты колебаний. Динамические расчеты проводятся в программном комплексе SCAD++ методом прямого интегрирования уравнений движения с использованием метода конечных элементов. Для анализа использовалась упрощенная модель общественного здания в виде системы с двумя степенями свободы, а также трехмерная модель здания. Основным исследуемым критерием сравнения приняты величины максимальных сейсмических ускорений. Результаты, полученные в ходе исследования, значительно отличаются для разных вариантов учета вязких демпферов в расчетной схеме и подтверждают необходимость использования частотно-зависимой модели.

Ключевые слова: пружинно-демпферная система сейсмоизоляции, вискодемпфер, частотно-зависимые вязкие демпферы, сейсмостойкость, землетрясение, сейсмоизоляция, сейсмический расчет.

Ссылка для цитирования: Гапоненко Б.О., Тарасов В.А. Учет характеристик вязких демпферов при сейсмических расчетах многоэтажных железобетонных зданий // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 11-20. EDN: HHDCMM.

ACCOUNTING THE CHARACTERISTICS OF VISCOUS DAMPERS IN SEISMIC CALCULATIONS OF MULTI-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

B.O. Gaponenko, V.A. Tarasov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. One of the ways to increase the seismic resistance of buildings and structures is the seismic isolation. Spring-damper seismic isolation includes spring blocks, usually modeled in the design scheme as linear elastic springs, and dampers, for which finite elements with a constant damping are used. In reality viscodampers are not ideally viscous and require taking into account the dependence of the stiffness and damping parameters on the oscillation frequency. Dynamic calculations were performed in SCAD++ software using time history analysis and the finite element method. For the analysis, a simplified model of a public building in the form of a system with two degrees of freedom, as well as a three-dimensional model of the building, was used for the analysis. The values of maximum seismic accelerations are accepted as the main criterion of comparison. The results obtained during the study differ significantly for different variants of accounting for viscous dampers in the design scheme and confirm the need to use a frequency-dependent model.

Keywords: spring-damper system of seismic isolation, visco-damper, frequency-dependent viscous dampers, seismic resistance, earthquake, seismic isolation, seismic calculation.

For citation: Gaponenko B.O., Tarasov V.A. Accounting the characteristics of viscous dampers in seismic calculations of multi-storey reinforced concrete buildings // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 11-20. EDN: HHDCMM.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в мире происходят тысячи землетрясений, обычно несколько десятков из них достаточно большой интенсивности, чтобы нанести ощутимый ущерб различным зданиям и сооружениям. В этот список попало и сильнейшее за 100 лет землетрясение в Турции и Сирии в 2023 г. В ходе землетрясения магнитудой до 8 в Турции было разрушено около 6 тыс. зданий. Несмотря на известный факт, что территория страны находится в сейсмически опасных зонах, построенные здания оказались недостаточно сейсмостойкими. Данный пример говорит о том, что есть острая необходимость в разработке теорий и практических решений по повышению сейсмостойкости зданий. При этом необходимо обеспечивать доступность методов, возможность их использования без существенного удорожания строительства. В связи с этим помимо консервативных методов повышения сейсмостойкости зданий развиваются различные более эффективные методы, например, применение систем сейсмоизоляции зданий [1, 2].

Сейсмоизоляция (сейсмозащита) – это технология снижения сейсмического воздействия на здания и сооружения, их части и оборудование путём введения в конструкции зданий и сооружений специальных конструктивных элементов, систем сейсмоизоляции.

При проектировании и расчете сейсмоизолированных зданий и сооружений необходимо корректно учитывать характер работы изолирующих устройств. В противном случае, в результатах расчетов возможно получение серьезных ошибок не в запас прочности и, как следствие, к катастрофическим разрушениям неграмотно запроектированных зданий и сооружений [3, 4].

В качестве объекта исследования выбрано сейсмоизолированное 9-ти этажное здание бизнес-центра с 1 подземным этажом. Данное здание характеризуется массовым нахождением людей и может быть отнесено к зданиям повышенной ответственности, к которому предъявляются дополнительные требования по сейсмостойкости.

Предметом исследования является влияние на сейсмостойкость здания бизнес-центра с пружинно-демпферной сейсмоизоляцией учета частотных зависимостей характеристик вязких демпферов.

Вычислительные эксперименты проведены методом прямого интегрирования уравнений движения в программном комплексе SCAD++ с использованием метода конечных элементов. Основным исследуемым критерием сравнения приняты величины максимальных сейсмических ускорений. Функции ускорений однозначно связаны с функциями перемещений, которые в свою очередь связаны с функциями динамических (сейсмических) внутренних усилий в элементах конструкций.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными является конечно-элементная расчетная модель здания в SCAD++ (рис. 1). Здание бизнес-центра с 9 наземным и 1 подземным этажом, размеры в осях 42 x 42 м. Конструктивная система здания – каркасно-ствольная, из монолитного железобетона, с ядром жесткости, расположенными в центре здания. Тип фундамента – плитный с устройством пружинно-демпферной сейсмоизоляции, толщина нижней плиты 1 м, толщина верхней плиты 0,5 м. Колонны сечением 500 x 500, балки сечением 400 x 400, перекрытия толщиной 200 мм. Основной шаг колонн 7 метров. Конструктивные решения симметричные в плане. Класс бетона стен и плит перекрытия В25, колонн – В30, фундаментных плит – В40.

Сбор нагрузок осуществлялся в соответствии с архитектурными и объёмно-планировочными решениями и СП 20.13330.2016.

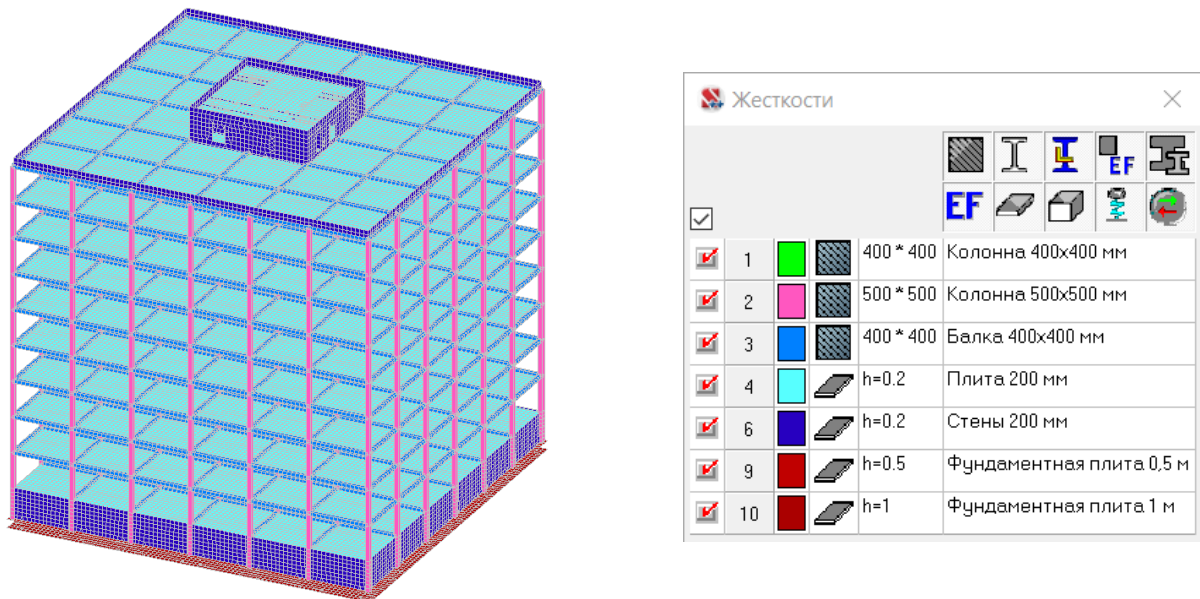


Рис. 1. Конечно-элементная расчетная модель здания в SCAD++ с принятыми толщинами
Fig. 1. Finite element calculation model of a building in SCAD++ with accepted thicknesses

РАСЧЕТ УПРОЩЕННОЙ СХЕМЫ ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

На первом этапе, для упрощения анализа и сокращения времени расчета сформирована модель с двумя степенями свободы. Использовалась схема сбора масс с разделением здания на 2 массы: выше и ниже слоя сейсмоизоляции (рис. 2).

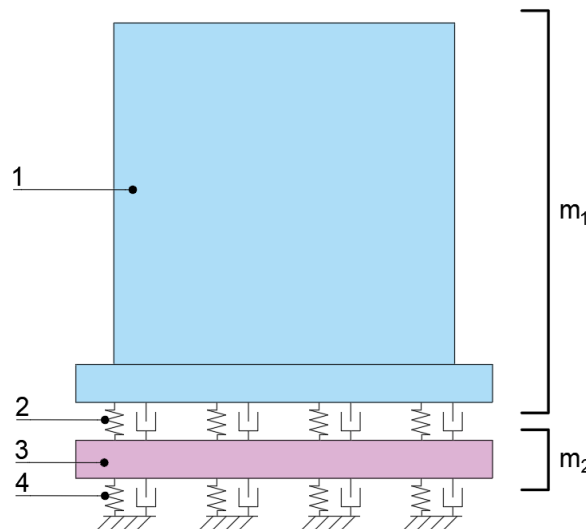


Рис. 2. Упрощенная схема здания: 1 – верхняя часть здания, включая верхнюю плиту фундамента, массой m_1 ; 2 – пружинно-демпферная сейсмоизоляция; 3 – нижняя фундаментная плита, массой m_2 ; 4 – модель грунта в виде упругого основания с линейным демпфированием

Fig. 2. Simplified scheme of the building: 1 – the upper part of the building, including the upper foundation, with a mass m_1 ; 2 – spring-damper seismic insulation; 3 – the lower foundation, with a mass m_2 ; 4 – a model of the soil as an elastic base with linear damping

Сбор масс осуществлялся в SCAD++:

$$m_1 = 29834,3 \text{ т};$$

$$m_2 = 4622,5 \text{ т}.$$

В соответствии с несущей способностью пружинных опор и весом здания подобрано необходимое количество опор. Опоры расставлены таким образом, чтобы центр жесткости совпадал с центром тяжести здания, для недопущения кручения в первых собственных формах колебаний.

Численные исследования проводились для 4х упрощенных расчетных схем в зависимости от способа учета параметров вискодемпферов и грунтового основания (рис. 3).

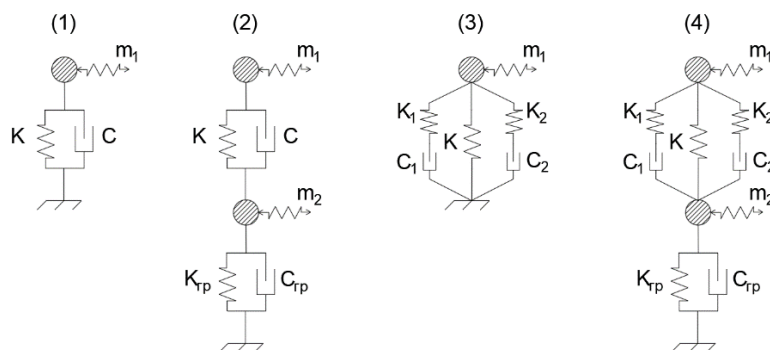


Рис. 3. Упрощенные расчетные схемы здания: 1 – модель с идеально вязким демпфером в слое сейсмоизоляции без учета грунтового основания; 2 – модель с идеально вязким демпфером в слое сейсмоизоляции с учетом характеристик грунтового основания; 3 – модель с частотно-зависимым демпфером в слое сейсмоизоляции без учета грунтового основания; 4 – модель с частотно-зависимым демпфером в слое сейсмоизоляции и учетом характеристик грунтового основания

Fig. 3. Simplified design schemes of the building: 1 – a model with an ideally viscous damper in the seismic insulation layer without accounting the soil base; 2 – a model with an ideally viscous damper in the seismic insulation layer accounting the characteristics of the soil base; 3 – a model with a frequency-dependent damper in the seismic insulation layer without accounting the soil base; 4 – a model with a frequency-dependent damper in the seismic insulation layer and accounting the characteristics of the soil base

На рис. 3 параметр K – суммарная жесткость пружинных опор, C – величина суммарного демпфирования идеально-вязких демпферов.

Частотная зависимость характеристик демпферов обеспечивается использованием в расчетах (для схем 3 и 4) четырех-параметрической модели Максвелла состоящей из двух параллельных цепочек, последовательно соединенных идеально-упругой пружины и идеально-вязкого демпфера со специальным образом подобранными характеристиками: параметры K_1, K_2 – значения динамических жесткостей; C_1, C_2 – параметры демпфирования. Данная методика предложена, апробирована и подтверждена экспериментально специалистами фирмы ООО «ЦКТИ-Вибросейсм»¹ [5].

Экспериментальные графики частотной зависимости жесткостей и демпфирования для используемого демпфера в вертикальном и горизонтальном направлениях представлены сплошными линиями, аппроксимация четырех-параметрической моделью Максвелла представлена пунктирными графиками (рис. 4). Данные графики получены на базе большого количества экспериментальных данных, полученных ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» и немецкой фирмой-производителем изоляторов «GERB» [6-8].

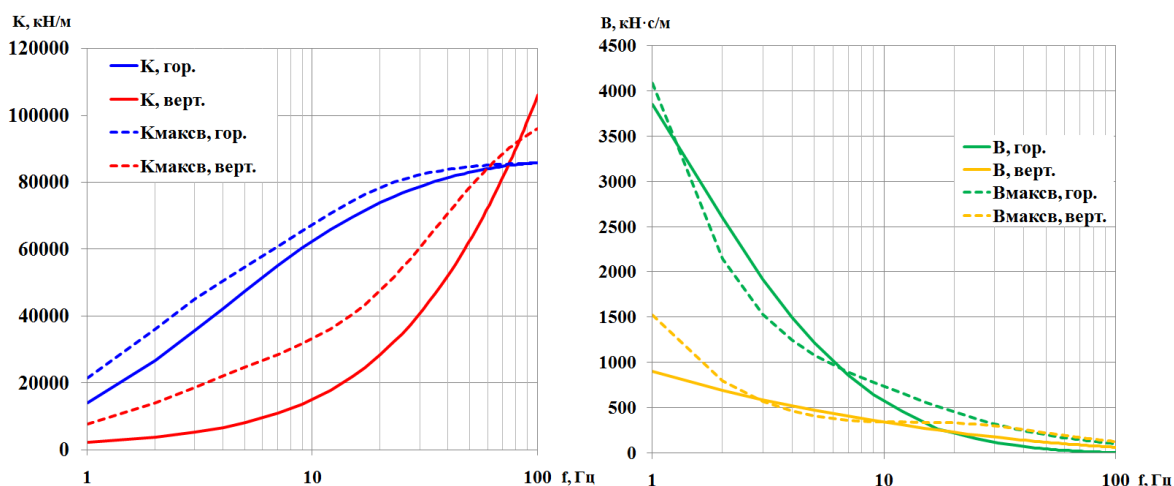


Рис. 4. Частотные зависимости динамических жесткостей (слева) и затуханий (справа). Сплошные линии - экспериментальные данные, пунктирные - аппроксимация четырех-параметрической моделью Максвелла

Fig. 4. Frequency dependences of dynamic stiffness (left) and damping (right). Solid lines - experimental data, dotted lines - approximation by the four-parametric Maxwell model

¹ Научно-исследовательская инженерная фирма ООО «ЦКТИ-ВИБРОСЕЙСМ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://cvs.spb.su/ru> (дата обращения: 20.09.2023)

Все вычисления производились в программе SCAD++ с использованием конечно-элементной модели прямым пошаговым интегрированием уравнений движения. При расчетах использовалась акселерограмма землетрясения в Турции 17 августа 1999 г., заданная в виде сейсмограммы в защемленный узел. Задано направление колебаний вдоль горизонтальной оси [9].

Для схем 2 и 4 моделирование грунтового основания осуществлялось с помощью специальных конечных элементов с линейной жесткостью и линейным затуханием. При расчете на сейсмическое воздействие необходимо использовать динамические характеристики основания: динамические жесткости и демпфирования [10]. Определение данных параметров осуществлялось с помощью методики, изложенной в ASCE 4-16², исходя из среднего значения динамического модуля сдвига и других характеристик для грунтов, попадающих в пределы сжимаемой толщи.

В данной работе используются характеристики реального грунта: суглинка, с динамическим модулем сдвига равным 650 МПа. Определяются суммарные значения жесткостей и затуханий по горизонтальному направлению для фундаментной плиты размером 43 x 43 м. Максимальное значение демпфирования в основании ограничено 15% в долях от критического для горизонтального направления, в соответствии с рекомендациями норм Германии³(таблица 1).

Таблица 1. Параметры модели грунтового основания для системы с двумя степенями свободы
Table 1. Parameters of the soil foundation model for a system with two degrees of freedom

| № | Параметр | Обозначение | Значение | Ед. изм. |
|---|---|-------------|----------|----------|
| 1 | Коэффициент динамической жесткости в горизонтальном направлении | $K_{гр}$ | 7,75E+07 | кН/м |
| 2 | Демпфирование в горизонтальном направлении (15%) | $C_{гр}$ | 4,90E+05 | кН·с/м |

Проводился анализ изменения значений максимальных ускорений вдоль горизонтальной оси в узле с массой m_1 при увеличении количества демпферов и соответственно величины относительного демпфирования в слое сейсмоизоляции (рис. 5).

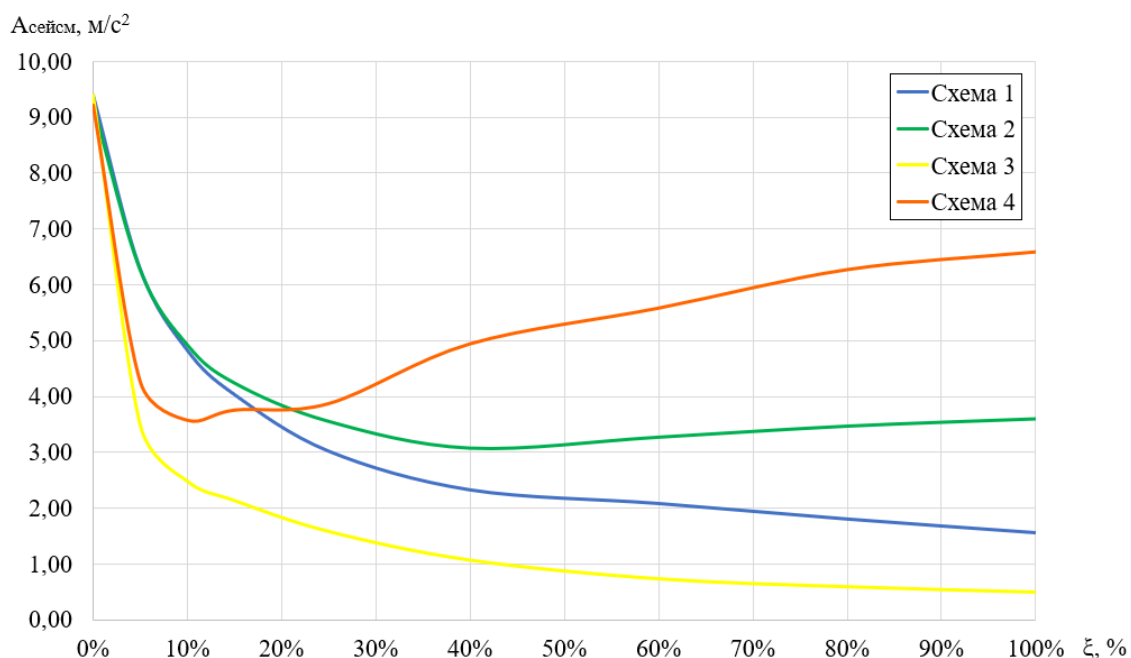


Рис. 5. Значения максимальных сейсмических ускорений по горизонтали в узле массой m_1 в зависимости от величины относительного затухания

Fig. 5. The values of the maximum horizontal seismic accelerations in a node of mass m_1 , depending on the relative damping value

²ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016

³Deutsche norm. DIN 4024 Part 1: Machine foundations; Flexible structures that support machines with rotating elements

Системы с 1 степенью свободы (схемы 1 и 3), не учитывающие параметры грунтового основания, показывают заниженные результаты ускорений по сравнению с аналогичными (схемы 2 и 4) при увеличении количества демпферов и не в полной мере отражают характер поведения реального сооружения, колеблющегося на грунтовом основании.

Графики систем с 2 степенями свободы (схемы 2 и 4) показывают также расхождения в результатах. В случае использования модели идеально-вязкого демпфера (схема 2), минимальные значения ускорений наблюдаются при 40% демпфировании в долях от критического, что не соответствует минимуму графика для системы с учетом частотно-зависимых характеристик демпферов (схема 4) при относительном демпфировании 10%. Также, значения ускорений при относительном демпфировании 40% отличаются в 1,5 раза.

РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ЗДАНИЯ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

На втором этапе исследования численные исследования проводились для 4х трехмерных расчетных схем здания аналогично упрощенным схемам: в зависимости от способа учета параметров вискодемпферов и грунтового основания (рис. 6).

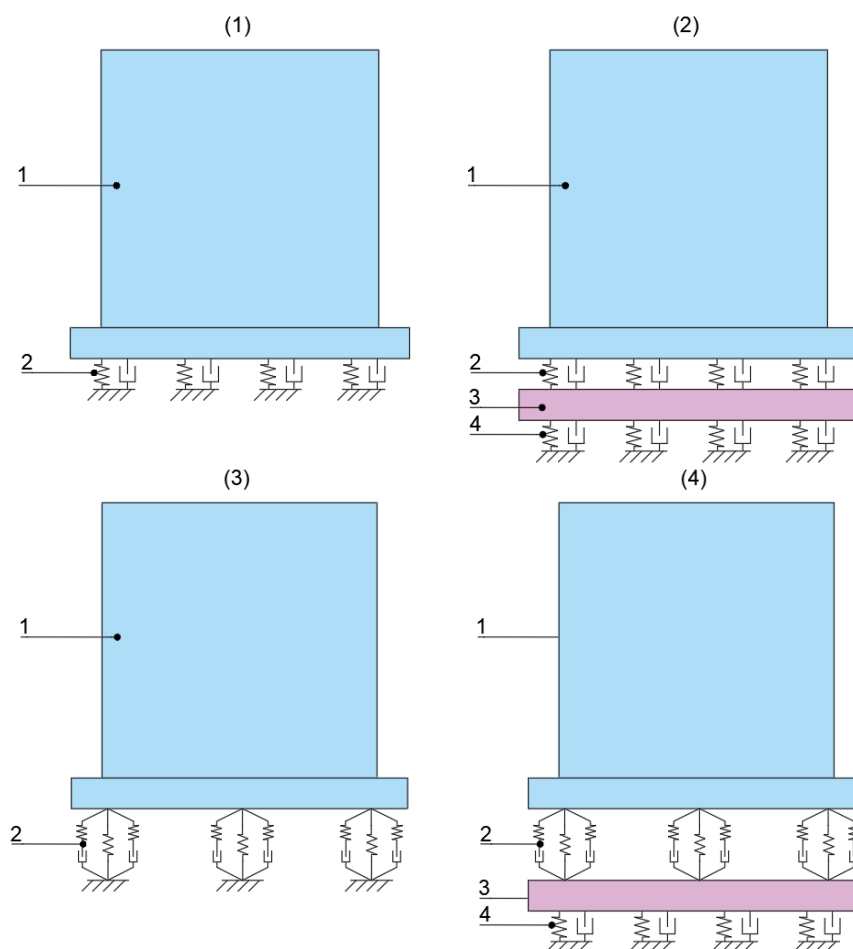


Рис. 6. Схемы трехмерных расчетных схем здания: (1) – модель с идеально вязким демпфером без учета характеристик грунтового основания; (2) – модель с идеально вязким демпфером с учетом характеристик грунтового основания; (3) – модель с частотно-зависимым демпфером без учета характеристик грунтового основания; (4) – модель с частотно-зависимым демпфером и учетом характеристик грунтового основания; 1 – верхняя часть здания, включая верхнюю плиту фундамента; 2 – пружинно-демпферная сейсмоизоляция; 3 – нижняя фундаментная плита; 4 – модель грунта в виде упругого основания с линейным демпфированием

Fig. 6. Schemes of three-dimensional design schemes of the building: (1) – a model with an ideally viscous damper without accounting the characteristics of the soil base; (2) – a model with an ideally viscous damper accounting the characteristics of the soil base; (3) – a model with a frequency-dependent damper without accounting the characteristics of the soil base; (4) – a model with a frequency-dependent damper and accounting the characteristics of the soil base; 1 – the upper part of the building, including the upper foundation; 2 – spring-damper seismic insulation; 3 – the lower foundation; 4 – a model of the soil as an elastic base with linear damping

Для трехмерных схем параметры демпферов задавались аналогично упрощенным схемам для обоих вариантов учета их характеристик. Однако суммарные значения разделялись на соответствующее количеству реальных демпферов количество специальных КЭ, равномерно расположенных по площади фундаментной плиты.

При расчетах также использовалась акселерограмма землетрясения в Турции 17 августа 1999 г., заданная в виде сейсмограммы во все заземленные узлы фундаментной плиты. Задано направление колебаний вдоль горизонтальной оси X.

Для схем 2 и 4 моделирование грунтового основания осуществлялось с помощью специальных конечных элементов с линейной жесткостью и линейным затуханием. При задании параметров грунтового основания в трехмерной схеме суммарные значения жесткости и демпфирования были разделены на 7693 специальных КЭ, приходящих в каждый узел фундаментной плиты. Определялись суммарные значения жесткостей по трем направлениям и при повороте фундаментной плиты относительно горизонтальных осей и значения затуханий также по трем направлениям для фундаментной плиты размером 43 x 43 м. Максимальное значение демпфирования в основании ограничено 15% для горизонтального направления и 35% в долях от критического значения - для вертикального (таблица 2).

Таблица 2. Параметры модели грунтового основания для трехмерной схемы
Table2. Parameters of the soil foundation model for a three-dimensional scheme

| № | Параметр | Обозначение | Суммарное значение | Ед. изм. |
|---|---|-------------|--------------------|----------|
| 1 | Коэффициент динамической жесткости в горизонтальном направлении | $K_{X(Y)}$ | 7,75E+07 | кН/м |
| 2 | Коэффициент динамической жесткости в вертикальном направлении | K_z | 1,13E+08 | кН/м |
| 3 | Коэффициент динамической жесткости при повороте относительно горизонтальной оси | K_ϕ | 2,39E+10 | кН·м |
| 4 | Демпфирование в горизонтальном направлении (15%) | $C_{X(Y)}$ | 4,90E+05 | кН·с/м |
| 5 | Демпфирование в вертикальном направлении (35%) | C_z | 1,38E+06 | кН·с/м |

Проводился анализ изменения значений максимальных ускорений вдоль горизонтальной оси X при увеличении количества демпферов и соответственно величины относительного демпфирования в слое сейсмоизоляции следующих узлах (рис. 7):

- узел в уровне верхней фундаментной плиты (рис. 8);
- узел в уровне перекрытия 4-го этажа (середина здания по высоте) (рис. 9);
- узел в уровне плиты покрытия (рис. 10).

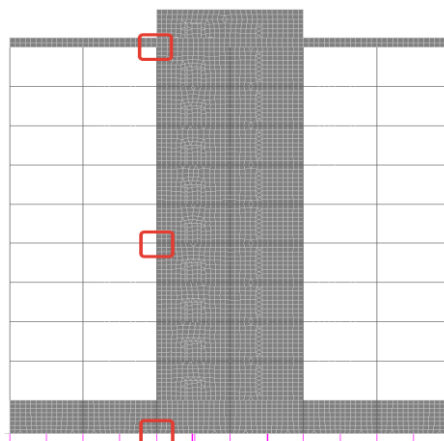


Рис. 7. Положение анализируемых узлов по высоте здания
Fig. 7. The position of the analyzed nodes according to the height of the building

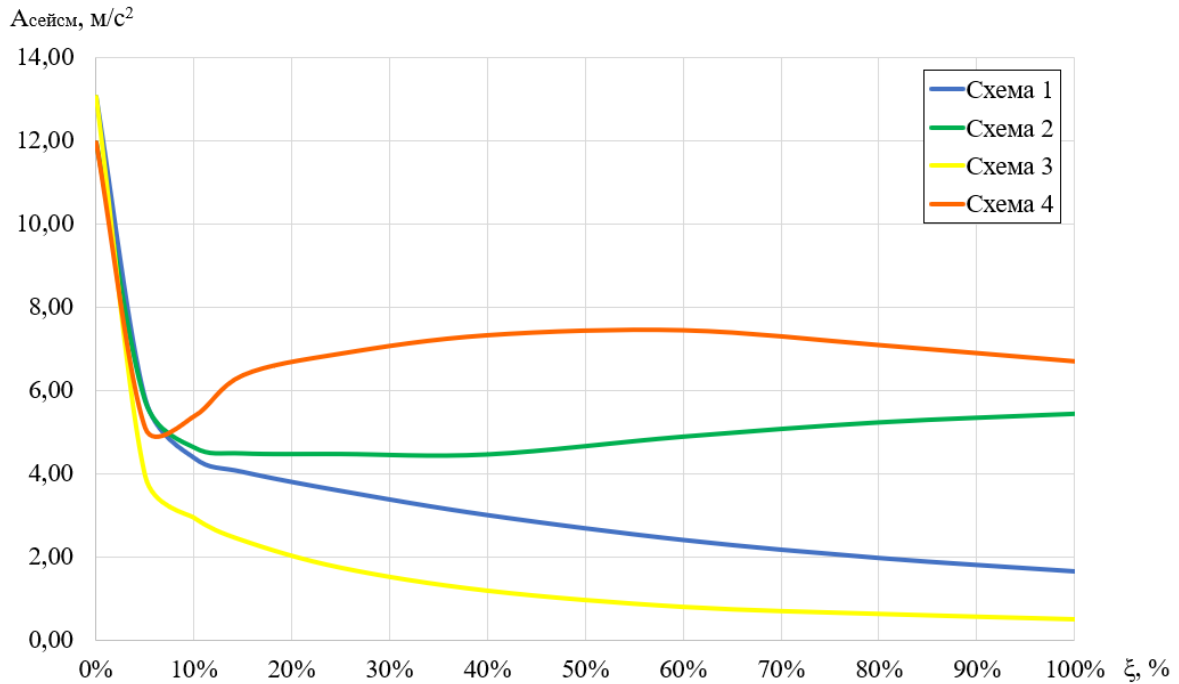


Рис. 8. Значения максимальных сейсмических ускорений по оси X в узле в уровне верхней фундаментной плиты в зависимости от величины относительного затухания

Fig. 8. The values of the maximum seismic accelerations along the X axis at the node at the level of the upper foundation plate, depending on the relative damping value

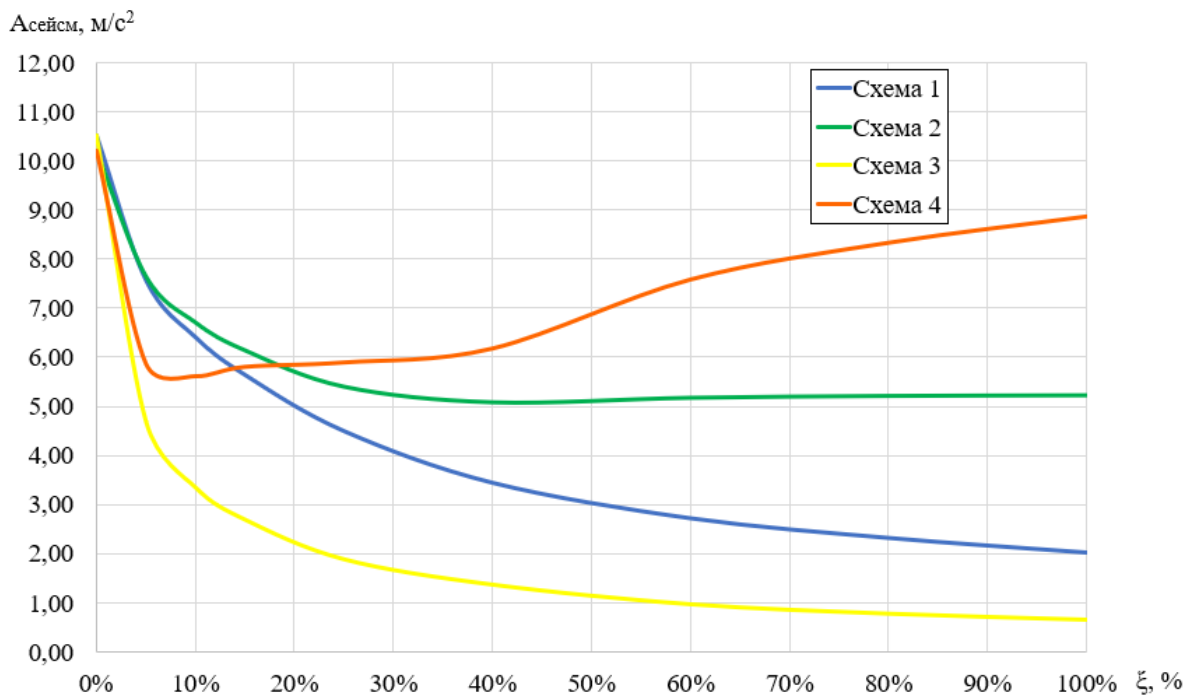


Рис. 9. Значения максимальных сейсмических ускорений по оси X в узле в уровне перекрытия 4-го этажа в зависимости от величины относительного затухания

Fig. 9. The values of the maximum seismic accelerations along the X-axis at the node at the 4th floor level, depending on the relative damping value

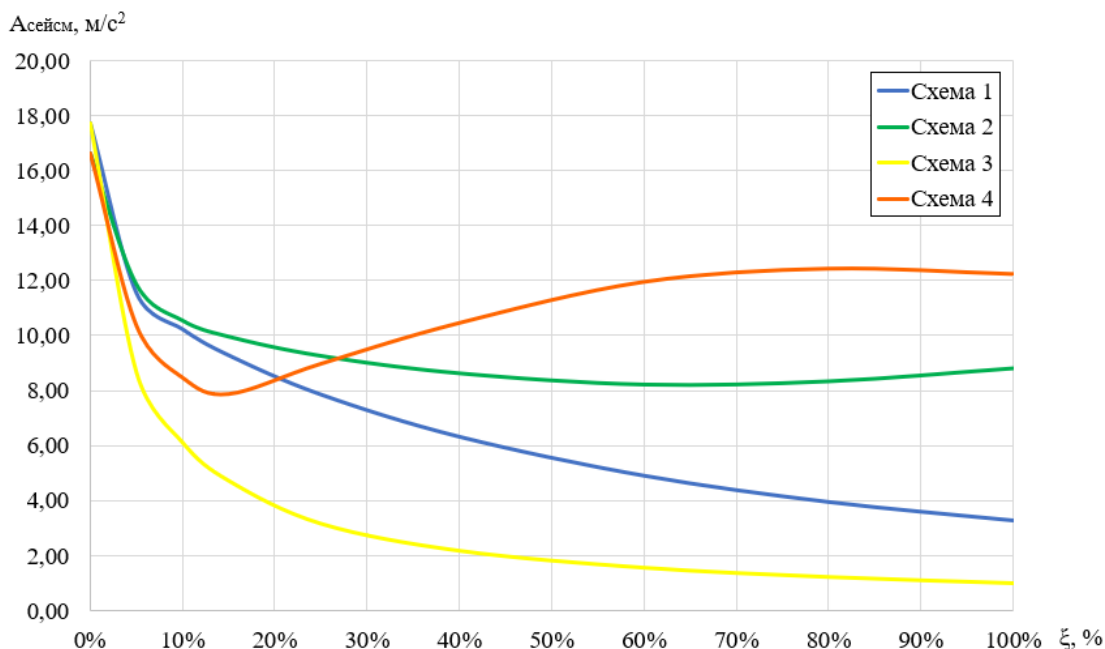


Рис. 10. Значения максимальных сейсмических ускорений по оси X в узле в уровне плиты покрытия в зависимости от величины относительного затухания

Fig. 10. The values of the maximum seismic accelerations along the X axis at the node at the level of the coating plate, depending on the relative damping value

Общий характер полученных графиков соответствует результатам, полученным при расчете упрощенных схем здания.

Наибольшая схожесть с графиками для упрощенных схем по абсолютным значениям наблюдается с графиком для узла в середине здания по высоте. Максимальные ускорения массы упрощенных схем при отсутствии демпфирования соответствуют значениям, полученным также для узла в середине здания по высоте. Значения полученные для узлов в уровне плиты покрытия значительно отличаются от значений для упрощенных схем в большую сторону. Соответственно, использование упрощенных схем не применимо для оценки значений максимальных ускорений верхних точек здания.

Вне зависимости от расположения рассматриваемого узла видно, что при расчете схем 1 и 3, не учитывающих параметры грунтового основания, результаты ускорений при увеличении количества демпферов занижены по сравнению с результатами для схем 2 и 4. Схемы 1 и 3 не в полной мере отражают характер работы конструкции и требования норм по расчету зданий совместно с основанием. Заниженные результаты в данном случае могут привести к ошибкам в проектировании сейсмоизоляции здания.

Аналогично результаты расчета схемы 2 и 4 также показывают расхождения в результатах. В случае использования модели с учетом частотно-зависимых характеристик демпферов (схема 4) минимальные значения ускорений для всех точек здания лежат в интервале относительного демпфирования от 5% до 25%. Для верхних точек здания минимальные значения ускорения соответствуют относительному демпфированию 70%. Значения ускорений при таком же демпфировании модели с учетом частотно-зависимых характеристик отличаются в 1,5 раза.

Соответственно, использование линейной модели демпферов может привести к подбору неправильного количества элементов сейсмоизоляции и достижению обратного эффекта: значительному увеличению максимальных ускорений, по сравнению с ожидаемыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполняя сейсмические расчеты зданий и сооружений с пружинно-демпферной сейсмоизоляцией, необходимо учитывать параметры, наиболее точно соответствующие реальной работе конструкций, подтвержденные экспериментальными данными. Для предотвращения критических ошибок в расчетах, следует учитывать динамические характеристики грунтового основания, а также частотные зависимости динамических жесткостей и демпфирований, используя четырех-параметрическую модель Максвелла.

С помощью упрощенных схем возможно приближенно оценить значения ускорений точек здания, а также примерно определить оптимальное значение относительного затухания для последующего

уточнения в трехмерной расчетной схеме и проектирования системы сейсмоизоляции. При использовании упрощенной схемы оптимальное относительное затухание лежит в интервале от 5% до 25%, что соответствует минимумам для разных точек здания. Использование 3D расчетной схемы необходимо для учета геометрии конструкций и распределения жесткостей при анализе ускорений наиболее важных точек здания. Максимальные ускорения в узле верха здания отличаются от ускорений массы упрощенной схемы в 2 -2,5 раза.

При анализе графика относительное затухание для наиболее детализированной 4-й схемы наблюдается локальный минимум в интервале от 5% до 25%, позволяющий подобрать необходимое количество демпферов в системе сейсмоизоляции. Данный эффект наблюдается и при расчёте упрощенной схемы и при рассмотрении трехмерной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belash T.A., Belashov M.S. The use of damping devices to increase the seismic resistance of frame buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sochi, 06–12 September 2020. Sochi, 2020. P. 022068. DOI 10.1088/1757-899X/962/2/022068. EDN: GYXBFN
2. Белаш Т.А., Ерохина Е.Д. Повышение сейсмостойкости эксплуатируемых зданий с использованием специальных методов сейсмозащиты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 3. С. 41-48. DOI 10.37153/2618-9283-2021-3-41-48. EDN QOEUIС
3. Бабский А.Е., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 36-49. DOI 10.37153/2618-9283-2021-5-36-49. EDN LCJNOS
4. Бабский А.Е., Лалин В.В., Олейников И.И., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 30-41. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-1-30-41. EDN RSXRRN
5. Костарев В.В., Павлов Д.Ю., Васильев П.С., Щукин А.Ю., Берковский А.М. Обеспечение сейсмостойкости и повышения надежности и ресурса трубопроводов с использованием технологии высоковязкого демпфера // ASSISi. 2011. № 1. С. 31–35
6. Kostarev V.V., Petrenko A.V., Vasilyev P.S. An advanced seismic analysis of an NPP powerful turbogenerator on an isolation pedestal // Nuclear engineering and design. 2007. Vol. 237. № 12–13. P. 1315–1324
7. Nawrotzki P., Kostarev V., Siepe D., Barutzki F., Salcedo V. 3D Seismic Isolation Systems for the Nuclear Industry Layout, Design & Qualification // SMIRT-26, Berlin/Potsdam, 10-15 July 2022. Berlin, 2022. P. 1-9.
8. Nawrotzki P., Kostarev V., Vasilyev P., Vaindrakh M. Seismic dynamic analysis, optimization, testing and probabilistic safety assessment of an innovative 3D seismic base isolation system for important structures // Proc. of the TINCE-2018 – Technological Innovations in Nuclear Civil Engineering, Paris, France, 29-31 August 2018, Paris, 2018. P. 27-33
9. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость // СПб: Наука. 1998. 255 с.
10. Белаш Т.А., Травин С.М. О Возможности использования существующих методов учета грунтового основания при динамических расчетах строительных конструкций // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1(44). С. 48-50. EDN: EWNEUH

ОБ АВТОРАХ

Борис Олегович Гапоненко – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: boris.ddy@yandex.ru

Владимир Александрович Тарасов – к.т.н., старший преподаватель. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: vtarasov1000@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Boris O. Gaponenko – master's degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: boris.ddy@yandex.ru

Vladimir A. Tarasov – Ph.D., senior lecturer. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: vtarasov1000@yandex.ru

УДК 69.07

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ ДЛИНЫ СТАЛЬНЫХ КОЛОНН В ПК ЛИРА САПР 2016R5

К.В. Парасюк¹, С.Ф. Дьяков²

¹Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка (Российская Федерация)

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье производится исследование возможности и корректности вычисления коэффициентов расчетной длины (привидения длины) в программе-сателлите Scad Office «Кристалл» и в ПК Лира САПР 2016R5, сопоставление их со значениями, вычисленными согласно указаниям СП 16.13330.2017, в связи с особенной важностью верного учета расчетных длин стальных конструкций при расчете на устойчивость. Для оценки коэффициентов расчетной длины в ПК Лира САПР 2016R5 производится сбор нагрузок на поперечную трехэтажную трехпролетную раму, производится расчет на устойчивость и создание условий «неустойчивости» стержней, путем исключения элементов из расчета. В статье рассмотрено вычисление коэффициентов расчетной длины для трехэтажной трехпролетной рамы, для средних и крайних колонн нижнего, среднего и верхнего этажей. Определено соответствие расчетов в программе «Кристалл» требованиям действующих норм, и указаны недостатки и сложности в расчете коэффициентов при помощи ПК Лира САПР 2016R5. Определены величины отклонений значений расчетных длин, полученных в программных комплексах от значений, вычисленных вручную.

Ключевые слова: устойчивость, расчетная длина, формы потери устойчивости, стальной каркас, колонна, программный комплекс, чувствительность.

Ссылка для цитирования: Парасюк К.В., Дьяков С.Ф. Определение коэффициентов расчетной длины стальных колонн в ПК ЛИРА САПР 2016R5 // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 21-33. EDN: NEMBQL.

DETERMINATION OF THE COEFFICIENTS OF THE CALCULATED LENGTH OF STEEL COLUMNS IN PC LIRA CAD 2016R5

K.V. Parasyuk¹, S.F. Dyakov²

¹Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka (Russian Federation)

²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article investigates the possibility and correctness of calculating the coefficients of the calculated length (ghost length) in the satellite program Scad Office "Crystal" and in the PC Lira CAD 2016R5, comparing them with the values calculated according to the instructions of SP 16.13330.2017, due to the particular importance of the correct accounting of the calculated lengths of steel structures when calculating for stability. To estimate the coefficients of the calculated length in the Lira CAD 2016R5 PC, loads are collected on a transverse three-storey three-span frame, stability calculations are performed and conditions for "instability" of the rods are created by excluding elements from the calculation. The article considers the calculation of the coefficients of the calculated length for a three-story three-span frame, for the middle and extreme columns of the lower, middle and upper floors. The compliance of the calculations in the "Crystal" program with the requirements of the current norms is determined, and the disadvantages and difficulties in calculating the coefficients using the Lira CAD 2016R5 PC are indicated. The values of deviations of the calculated lengths obtained in software complexes from the values calculated manually are determined.

Keywords: stability, estimated length, forms of loss of stability, steel frame, column, software package, sensitivity.

For citation: Parasyuk K.V., Dyakov S.F. Determination of the coefficients of the calculated length of steel columns in PC LIRA CAD 2016R5 // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 21-33. EDN: NEMBQL.

ВВЕДЕНИЕ

С начала появления строительных компьютерных программ, инженеры и программисты стараются использовать их максимальный потенциал, с целью ускорения и снижения трудоемкости расчетов строительных конструкций. В настоящее время особой популярностью пользуются программы систем автоматизированного проектирования (САПР) и программы информационного моделирования (BIM). Основной целью которых на данный момент считается обеспечение возможности создания проектной документации и расчета конструкций в рамках одного программного комплекса. В связи с чем, многие проектировщики и исследователи задаются вопросами корректности заложенных алгоритмов и возможности определения некоторых важных и сложных параметров строительных конструкций. К примеру, одним из таких параметров для стальных конструкций являются расчетные длины элементов стальных конструкций, от которых зависит устойчивость, и гибкости конструкций.

Споры о верности и различности методик, в определении расчетных длин ведутся с конца 40-х годов 20го века, с появлением фундаментальных работ Корноухова Н.В. [1] и Лейтеса С.Д. [2].

В своей монографии Перельмутер А.В. [3] описывает широкую распространенность методики, изложенной в СП 16.13330.2017 отсутствием достойной и точной альтернативы.

Многие ученые до сих пор производят исследования в области устойчивости сжатых стержней. В статьях [4-6] авторы производят исследование устойчивости ветви стальной колонны, с уточнением коэффициента расчетной длины. В работе Плотникова Н.А. [7] описана проблема широкого разнообразия конструктивных схем зданий и отсутствие для них конкретных методик для определения расчетных длин стальных колонн, с учетом множества факторов, что ведет в одних случаях к удорожанию конструкций, в иных ситуациях к уменьшению запаса устойчивости.

В статье [8] показано многообразие различных подходов к определению коэффициентов расчетной длины для стальных колонн, произведен анализ характеристик устойчивости.

В работах [9,10] производилось численное исследование и анализ коэффициентов расчетных длин одноступенчатых колонн промзданий.

Люфт Н.А., Никольский А.В. и Себешев В.Г. в работе [11] исследовали корректность поэлементной проверки устойчивости сжатых стержней в расчетах ферм с жесткими узлами, и выявили ситуации, в которых поэлементный расчет по нормам может давать ошибки не в запас устойчивости.

Исследование [12] посвящено экспериментальным испытаниям трубобетонных образцов различных длин и условий опирания на центральное сжатие. Была выполнена оценка расчетной длины при условиях опирания «защемление-шарнир» для частично податливой заделки.

Работа Пешковой Е.В. [13] продолжила тему исследования [10] в области уточнения коэффициента расчетной длины колонн из плоскости рамы для сквозных сечений колонн.

В статье Горохова Е.В. и Мущанова А.В. [14] представлены результаты исследования конструктивных решений узлов структурных конструкций на величину критической силы и формы потери устойчивости центрально-сжатым элементом покрытия.

Работа [15] посвящена обсуждению парадоксов, причине их появления и роли в оценке корректности расчетных моделей. На примерах из строительной механики показано, что появление некоторых парадоксов связано с выбором расчетной модели, которая не полностью учитывает особенности реального объекта.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ, ОБЩИЙ ВИД РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

В качестве исследования было произведено моделирование плоской трехэтажной трехпролетной поперечной рамы, имеющей жесткое сопряжение колонн с фундаментом, жесткое сопряжение ригелей с колоннами. Общий вид рамы приведен на рис. 1. Пролет был принят одинаковым для каждого ригеля, со значением $l = 6\text{м}$. Высота каждого этажа была принята также одинаковой, со значением $l_c = 3,3\text{м}$. В качестве поперечных сечений для элементов были выбраны:

- для колонн двутавр №30К1 по СТО АСЧМ 20-93 с осевым моментом инерции $I_c = 18850\text{см}^4$ (тип жесткости 1);

- для ригелей двутавр №25Б1 по СТО АСЧМ 20-93 с осевым моментом инерции $I_s = 3537\text{см}^4$ (тип жесткости 2).

Трехпролётная трехэтажная поперечная рама была выбрана с целью охвата и рассмотрения определения коэффициентов расчетной длины для колонн нижнего, среднего и верхнего этажей.

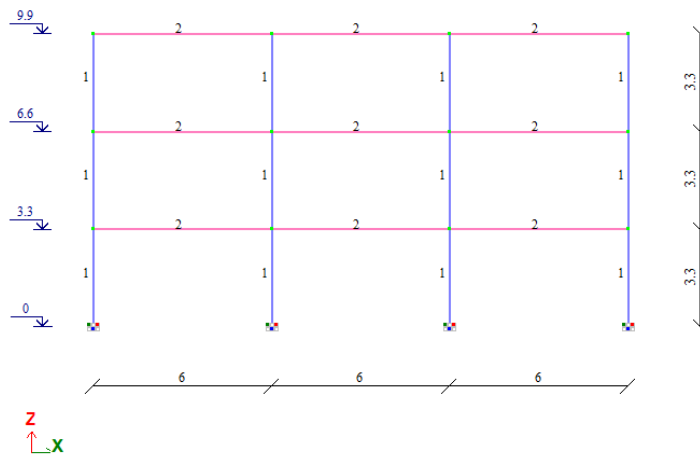


Рис. 1. Общий вид поперечной рамы
Fig. 1. General view of the transverse frame

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСЧЕТНОЙ ДЛИНЫ СОГЛАСНО ТАБЛИЦЕ 31 СП 16.13330.2017

Согласно п.10.3.2 СП 16.13330.2017 рассматриваемая поперечная рама относится к свободной (нераскрепленной), так как не имеет связей с другими конструкциями, препятствующими перемещению узлов колонн в плоскости рамы.

Рассмотрим колонны нижнего этажа:

Согласно таблице 31 СП 16.13330.2017, расчетная формула для определения коэффициента приведения длины зависит от параметров p и n , отражающих степень препятствования повороту нижнего и верхнего узлов колонны, соответственно.

Для колонн нижнего этажа параметры определяют по формулам (1) и (2):

$$p = \frac{2 \cdot k \cdot (p_1 + p_2)}{k + 1} \quad (1)$$

где k – число пролётов ригелей;

p_1, p_2 – параметры, отражающие степень препятствования повороту нижнего узла колонны, для элемента рассматриваемой и соседней ячеек.

$$n = \frac{k \cdot (n_1 + n_2)}{k + 1} \quad (2)$$

где n_1, n_2 – параметры, отражающие степень препятствования повороту верхнего узла колонны, для элемента рассматриваемой и соседней ячеек.

Определим неизвестные параметры:

$$p_1 = p_2 = \frac{I_i \cdot l_c}{I_c \cdot l} = \frac{\infty \cdot 3,3}{18850 \cdot 6} = \infty$$

где I_i – момент инерции сечения ригелей, примыкающих к нижнему концу проверяемой колонны; $l=6\text{м}$ – пролеты ригелей рамы.

$$n_1 = n_2 = \frac{I_s \cdot l_c}{I_c \cdot l} = \frac{3537 \cdot 3,3}{18850 \cdot 6} = 0,103$$

где I_s – момент инерции сечения ригелей, примыкающих к верхнему концу проверяемой колонны;

Определим параметры p и n для колонны нижнего этажа:

$$p = \frac{2 \cdot 3 \cdot (\infty + \infty)}{3 + 1} = \infty$$

$$n = \frac{3 \cdot (0,103 + 0,103)}{3 + 1} = 0,1545$$

Данная колонна нижнего этажа попадает в частный случай, и коэффициент расчетной длины для нее определяется по формуле (3) (т.к. $n=0,1545$ находится в пределах от 0,03 до 0,2):

$$\mu = 1,21 \cdot \sqrt{\frac{n+0,22}{n+0,08}} = 1,21 \cdot \sqrt{\frac{0,1545+0,22}{0,1545+0,08}} = 1,53 \quad (3)$$

Рассмотрим колонны среднего этажа:

Для колонн среднего этажа параметры определяют по формулам (4) и (5):

$$p = \frac{k \cdot (p_1 + p_2)}{k + 1} \quad (4)$$

$$n = \frac{k \cdot (n_1 + n_2)}{k + 1} \quad (5)$$

Определим неизвестные параметры:

$$p_1 = p_2 = \frac{I_i \cdot l_c}{I_c \cdot l} = \frac{3537 \cdot 3,3}{18850 \cdot 6} = 0,103$$

$$n_1 = n_2 = \frac{I_s \cdot l_c}{I_c \cdot l} = \frac{3537 \cdot 3,3}{18850 \cdot 6} = 0,103$$

Определим параметры p и n для колонны среднего этажа:

$$p = \frac{3 \cdot (0,103 + 0,103)}{3 + 1} = 0,1545$$

$$n = \frac{3 \cdot (0,103 + 0,103)}{3 + 1} = 0,1545$$

Для данной колонны коэффициент расчетной длины определяется по формуле (6) (т.к. $n=0,1545 < 0,2$):

$$\mu = \frac{(p+0,68) \cdot \sqrt{n+0,22}}{\sqrt{0,68 \cdot p \cdot (p+0,9) \cdot (n+0,08) + 0,1 \cdot n}} = 2,51 \quad (6)$$

Рассмотрим колонны верхнего этажа:

Для колонн верхнего этажа параметры определяют по формулам (7) и (8):

$$p = \frac{k \cdot (p_1 + p_2)}{k + 1} \quad (7)$$

$$n = \frac{2 \cdot k \cdot (n_1 + n_2)}{k + 1} \quad (8)$$

Определим неизвестные параметры:

$$p_1 = p_2 = \frac{I_i \cdot l_c}{I_c \cdot l} = \frac{3537 \cdot 3,3}{18850 \cdot 6} = 0,103$$

$$n_1 = n_2 = \frac{I_s \cdot l_c}{I_c \cdot l} = \frac{3537 \cdot 3,3}{18850 \cdot 6} = 0,103$$

Определим параметры p и n для колонны среднего этажа:

$$p = \frac{3 \cdot (0,103 + 0,103)}{3 + 1} = 0,1545$$

$$n = \frac{2 \cdot 3 \cdot (0,103 + 0,103)}{3 + 1} = 0,309$$

Для данной колонны коэффициент расчетной длины определяется по формуле (9) (т.к. $n=0,309 > 0,2$):

$$\mu = \frac{(p+0,63) \cdot \sqrt{n+0,28}}{\sqrt{p \cdot n \cdot (p+0,9) + 0,1 \cdot n}} = 2,11 \quad (9)$$

Учтем наличие разнонагруженности колонн, по формуле 146 СП 16.13330.2017, уменьшением коэффициента расчетной длины для средней колонны нижнего этажа:

$$\mu_{ef} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N}{N_c \cdot \sum I}} = 1,53 \cdot \sqrt{\frac{18850 \cdot 2625,92}{876,96 \cdot 75400}} = 1,32$$

где $\sum N$ – сумма продольных сил во всех колоннах нижнего этажа рамы;

N_c – усилие в средней колонне нижнего этажа;
 $\sum I$ – сумма моментов инерции всех колонн нижнего этажа рамы.
 Для средней колонны среднего этажа:

$$\mu_{ef} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N}{N_c \cdot \sum I}} = 2,51 \cdot \sqrt{\frac{18850 \cdot 1750,34}{585,04 \cdot 75400}} = 2,17$$

Для средней колонны верхнего этажа:

$$\mu_{ef} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N}{N_c \cdot \sum I}} = 2,11 \cdot \sqrt{\frac{18850 \cdot 875,16}{293,79 \cdot 75400}} = 1,82$$

Учтем влияние поддерживающего эффекта и увеличение коэффициента расчетной длины для крайних колонн по формуле 146 СП 16.13330.2017:

Для крайней колонны нижнего этажа:

$$\mu_{ef} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N}{N_c \cdot \sum I}} = 1,53 \cdot \sqrt{\frac{18850 \cdot 2625,92}{435,8 \cdot 75400}} = 1,88$$

Для крайней колонны среднего этажа:

$$\mu_{ef} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N}{N_c \cdot \sum I}} = 2,51 \cdot \sqrt{\frac{18850 \cdot 1750,34}{290,13 \cdot 75400}} = 3,0$$

Для крайней колонны верхнего этажа:

$$\mu_{ef} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N}{N_c \cdot \sum I}} = 2,11 \cdot \sqrt{\frac{18850 \cdot 875,16}{143,79 \cdot 75400}} = 2,6$$

Корректность вычисленных коэффициентов расчетной длины проверим при помощи программы-сателлита Scad Office «Кристалл». Вычисленные значения и параметры программы представлены на рисунках 2-4.

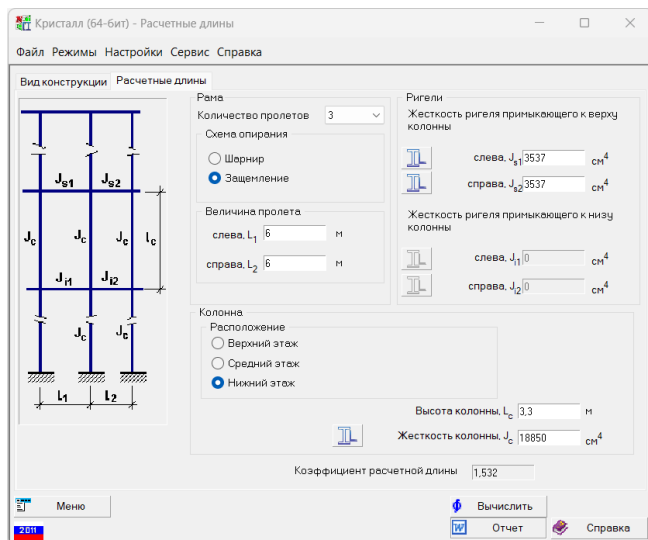


Рис. 2. Результат расчета программы «Кристалл» для колонны нижнего этажа

Fig. 2. The result of the calculation of the program "Crystal" for the column of the lower floor

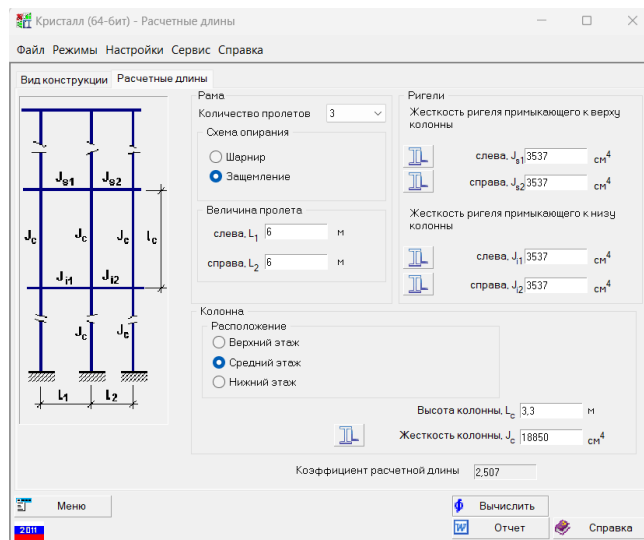


Рис. 3. Результат расчета программы «Кристалл» для колонны среднего этажа

Fig. 3. The result of the calculation of the "Crystal" program for the middle floor column

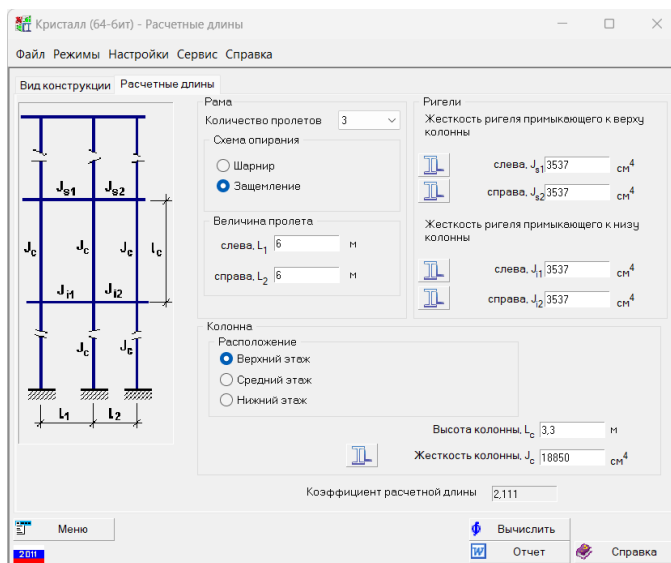


Рис. 4. Результат расчета программы «Кристалл» для колонны верхнего этажа
 Fig. 4. The result of the calculation of the "Crystal" program for the upper floor column

Как можно увидеть, из результатов расчета вручную и результатов сертифицированной программы «Кристалл», результаты определения коэффициентов расчетной длины, без учета разнагруженности, выполнены корректно согласно требованиям СП 16.13330.2017. Параметр учета разнагруженности колонн в программе «Кристалл» отсутствует, однако, его отсутствие можно учесть благодаря формуле 146 СП 16.13330.2017 и ручному расчету согласно её положениям.

РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ РАМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ В ПК ЛИРА САПР 2016R5

Для корректного расчета на устойчивость, с учетом множества форм возможной потери устойчивости, произвели разбивку стержневых элементов колонн на 10 штук, в границах каждого этажа, длиной по $l_{ст} = 0,33$ м. Создали 3 различных нагружения, включающих постоянную нагрузку от собственного веса, постоянную нагрузку от веса конструкций полов и временную кратковременную полезную нагрузку. При этом, постоянная нагрузка от собственного веса принималась автоматически, в ПК Лира САПР 2016R5, с учетом коэффициента надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,05$.

Постоянная нагрузка от пола принималась: $q=36$ кН/м. Временная кратковременная полезная нагрузка принималась: $q=11,7$ кН/м. Данные значения были приняты при величине грузовой площади для рамы $b=6$ м и значениях площадных нагрузок 6кПа и 1,95кПа соответственно.

Для расчета на устойчивость создали расчетное сочетание нагрузок (РСН), с коэффициентами сочетаний $\psi = 1,0$.

Согласно справочной информации, предоставляемой разработчиками ПК Лира САПР, и представленной на рисунке 5, различают «неустойчивые» стержни, теряющие устойчивость из-за действующих на него нагрузок, и стержни, теряющие устойчивость вынужденно, из-за потери устойчивости «неустойчивыми» стержнями.

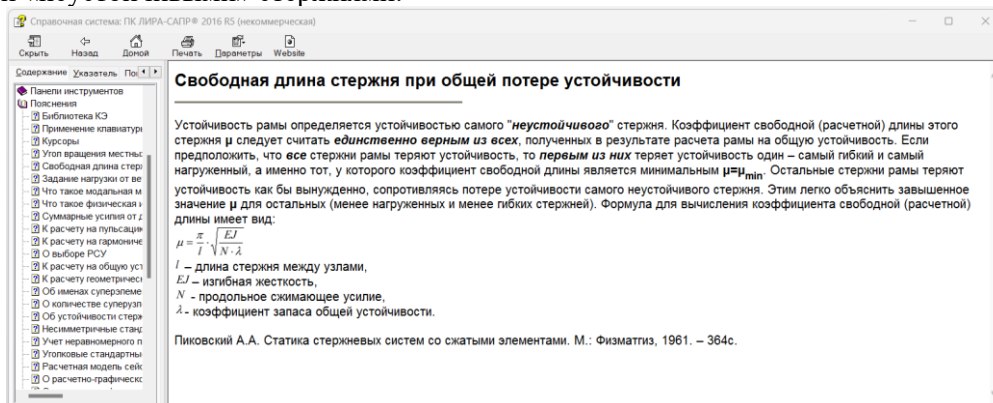


Рис. 5. Справочная информация ПК Лира САПР о свободной длине
 Fig. 5. Reference information of PC Lira CAD about free length

Стержни, теряющие устойчивость первыми, можно определить при помощи инструмента «параметр чувствительности», который присваивает значение от 1 до 0, в зависимости от степени ответственности стержня за потерю устойчивости системы. Таким образом, коэффициент расчетной длины будет корректным только для стержней, с параметром чувствительности равным или близким к единице. Параметры расчетной длины остальных стержней не являются корректными.

Согласно изложенным данным, выполняем расчет на устойчивость, и ищем формы потери устойчивости, при которых значения параметров чувствительности для интересующих нас стержней будут близки или равны единице.

В результате расчета на устойчивость рамы в целом, получили параметр чувствительности равный 1, для крайних колонн нижнего этажа по второй форме потери устойчивости (рис. 6). При этом, коэффициент расчетной длины в ПК Лира САПР определяется по формуле (10):

$$\mu = \frac{L_y \cdot l_{cm}}{l_{geom}} \quad (10)$$

где L_y – коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР;

l_{cm} – длина разбиения стержня колонны;

l_{geom} – геометрическая длины колонны между точками закрепления.

Для крайних колонн нижнего этажа получили коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=15,9$, представленный на рис. 7.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для крайних колонн нижнего этажа равняется:

$$\mu = \frac{15,9 \cdot 0,33}{3,3} = 1,59$$

Данное значение близко, к полученному ранее значению $\mu = 1,53$

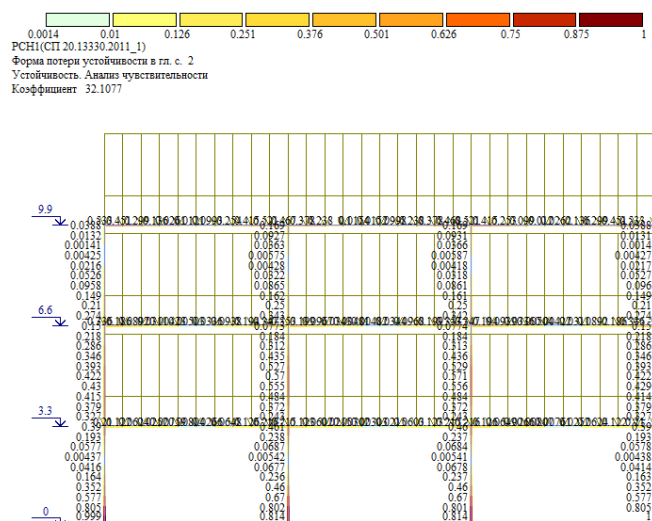


Рис. 6. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 6. Mosaic of sensitivity parameters

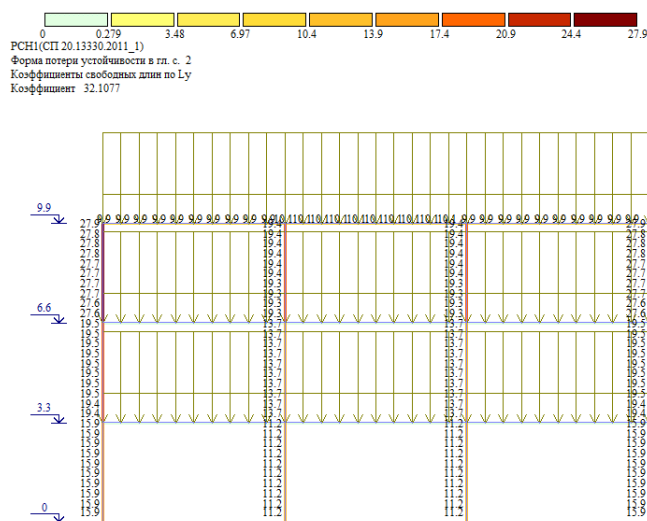


Рис. 7. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 7. Mosaic of calculated length coefficients

По 3й форме потери устойчивости получили параметр чувствительности для средних колонн нижнего этажа равным 1. (рис. 8), при этом, коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=8,03$, представленный на рис. 9.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для средних колонн нижнего этажа равняется:

$$\mu = \frac{8,03 \cdot 0,33}{3,3} = 0,8$$

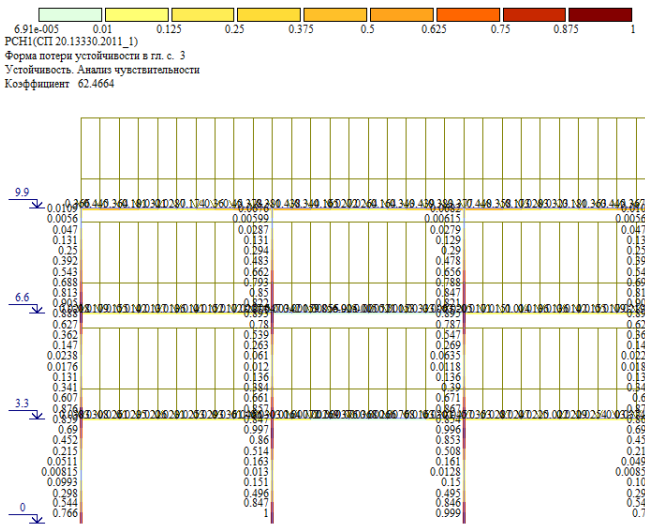


Рис. 8. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 8. Mosaic of sensitivity parameters

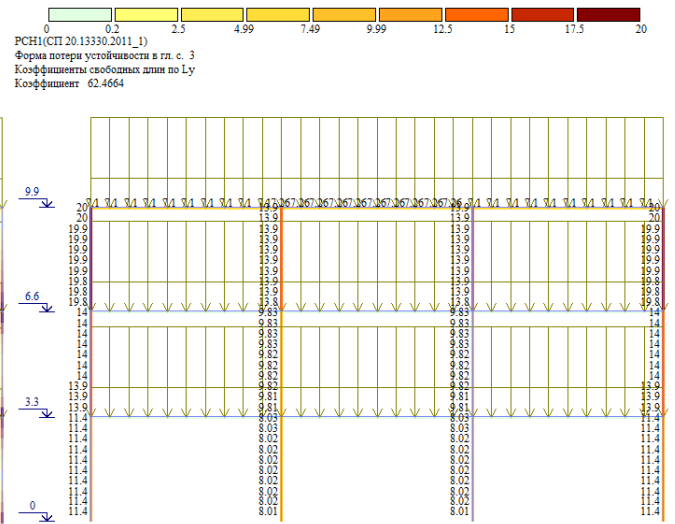


Рис. 9. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 9. Mosaic of calculated length coefficients

По 4й форме потери устойчивости получили параметр чувствительности для средних колонн среднего этажа равным 1. (рис. 10), при этом, коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=8,59$, представленный на рис. 11.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для средних колонн среднего этажа равняется:

$$\mu = \frac{8,59 \cdot 0,33}{3,3} = 0,86$$

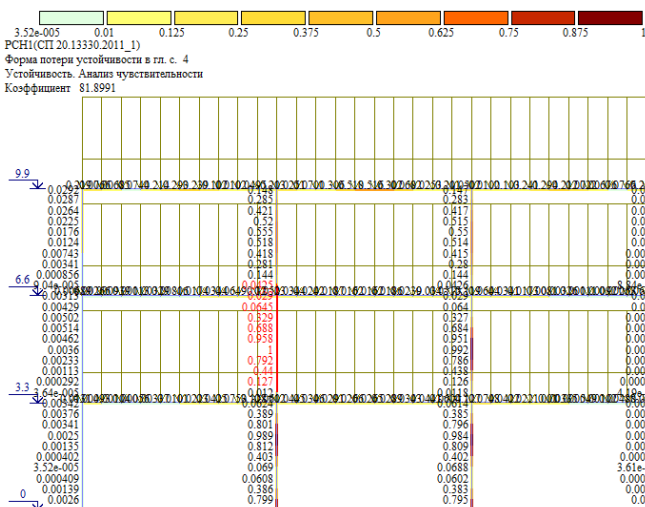


Рис. 10. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 10. Mosaic of sensitivity parameters

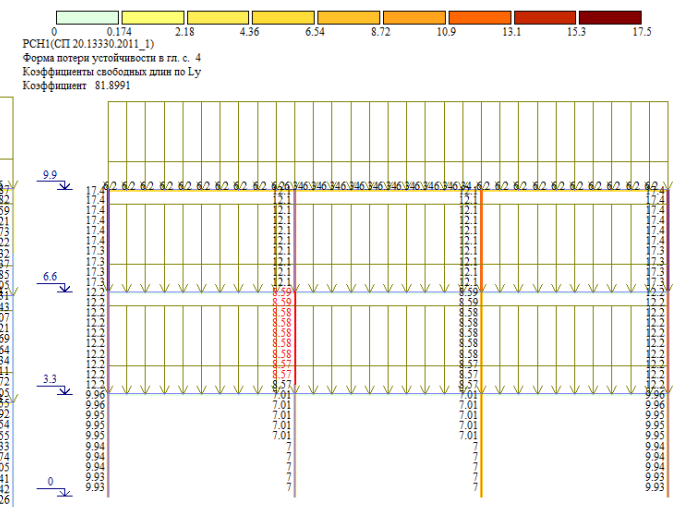


Рис. 11. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 11. Mosaic of calculated length coefficients

По остальным 10ти принятым формам, при расчете рамы в целом, значения параметра чувствительности для колонн равным или близким к единице не обнаружено.

Предположим, что для обнаружения параметра чувствительности равного или близкого по значению единице, для колонн других этажей, необходимо в расчете устойчивости исключить колонны нижнего этажа, так как при их учете, программа выдает значения, показывающие, что потеря устойчивости системы происходит в основном из-за потери устойчивости нижними колоннами.

В результате расчета схемы, без учета в модуле «Устойчивость» колонн нижнего этажа, по 2й форме потери устойчивости получили параметр чувствительности для крайних колонн верхнего этажа равным 1. (рис. 12), при этом, коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=22,2$, представленный на рис. 13.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для крайних колонн верхнего этажа равняется:

$$\mu = \frac{22,2 \cdot 0,33}{3,3} = 2,22$$

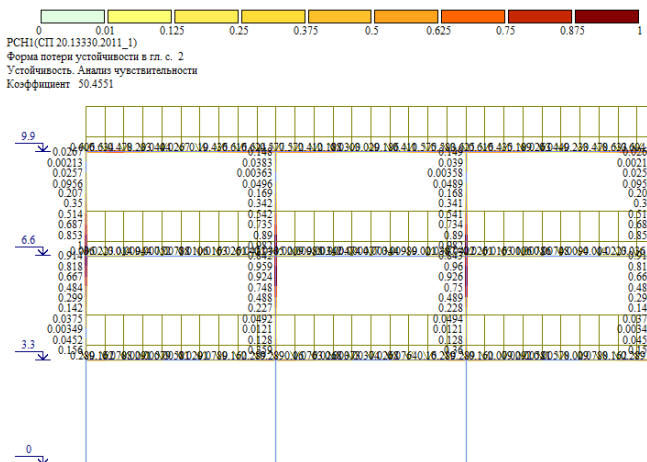


Рис. 12. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 12. Mosaic of sensitivity parameters

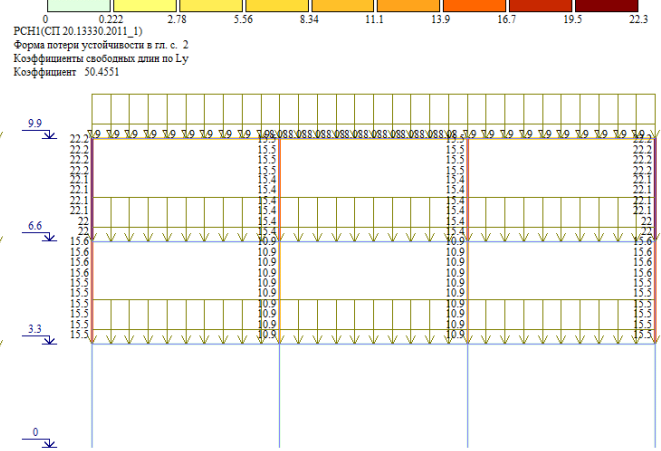


Рис. 13. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 13. Mosaic of calculated length coefficients

По остальным 10ти принятым формам, при расчете рамы без колонн нижнего этажа, значения параметра чувствительности для колонн равным или близким к единице не обнаружено, согласно данным программы, потеря устойчивости системы происходит из-за потери устойчивости ригелей верхнего этажа.

В результате расчета схемы, без учета в модуле «Устойчивость» колонн нижнего этажа и ригелей верхнего этажа, по 2й форме потери устойчивости получили параметр чувствительности для средних колонн среднего этажа равным 1. (рис. 14), при этом, коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=10,6$, представленный на рис. 15.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для средних колонн среднего этажа равняется:

$$\mu = \frac{10,6 \cdot 0,33}{3,3} = 1,06$$

Однако важно заметить, что коэффициент расчетной длины для средних колонн среднего этажа уже был получен ранее, по более высокой форме потери устойчивости, со значением $\mu = 0,86$.

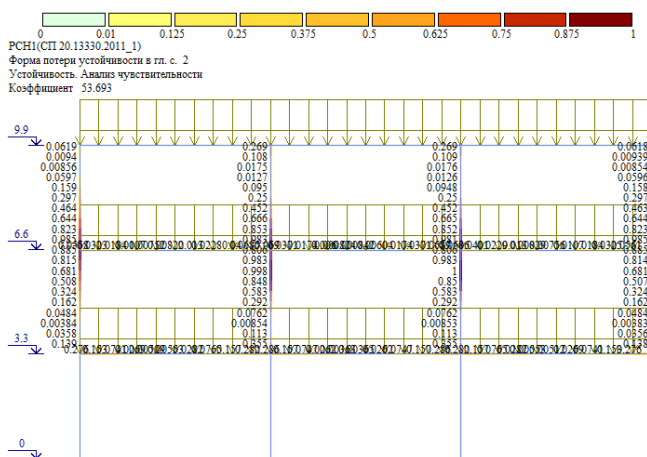


Рис. 14. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 14. Mosaic of sensitivity parameters

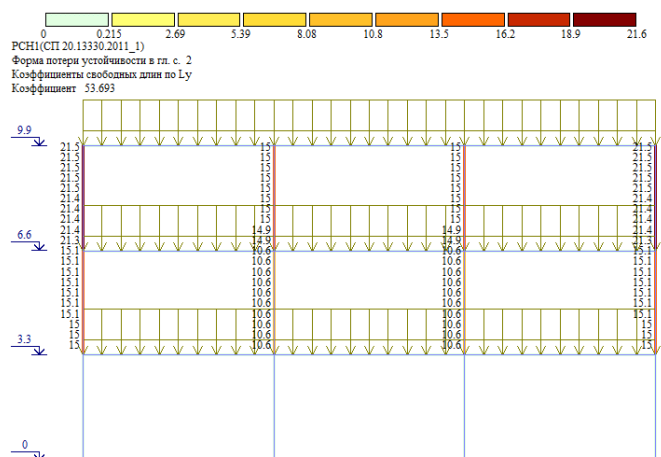


Рис. 15. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 15. Mosaic of calculated length coefficients

По остальным 10ти принятым формам, при расчете рамы без колонн нижнего этажа и ригелей верхнего этажа, значения параметра чувствительности для колонн равным или близким к единице не обнаружено. Исключим дополнительно средние колонны среднего этажа.

В результате расчета схемы, без учета в модуле «Устойчивость» колонн нижнего этажа, средних колонн среднего этажа и ригелей верхнего этажа, по 2й форме потери устойчивости получили параметр чувствительности для средних колонн верхнего этажа равным 1. (рис. 16), при этом, коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=11,2$, представленный на рис. 17.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для средних колонн верхнего этажа равняется:

$$\mu = \frac{11,2 \cdot 0,33}{3,3} = 1,12$$

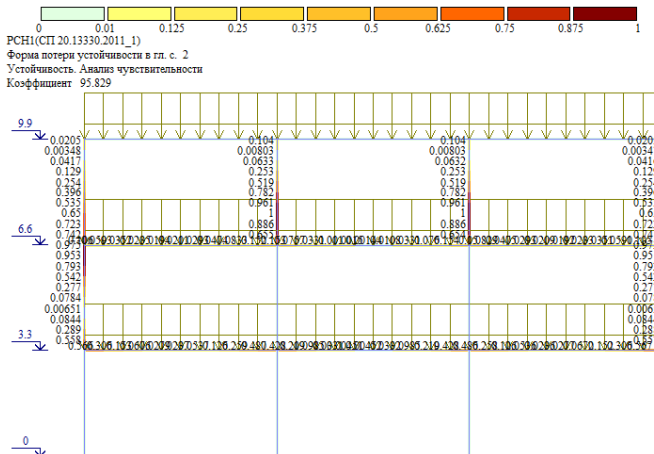


Рис. 16. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 16. Mosaic of sensitivity parameters

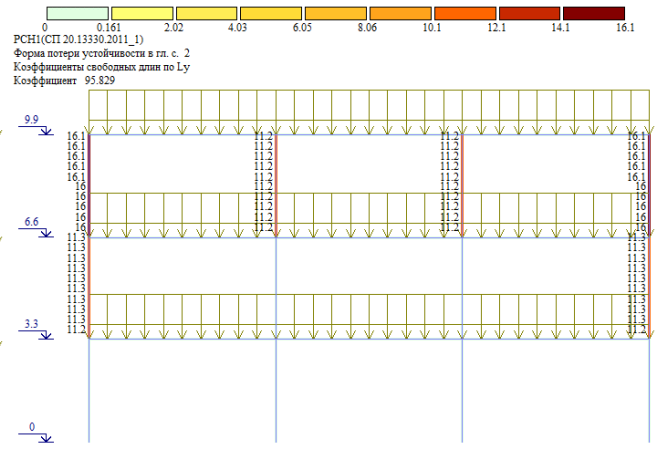


Рис. 17. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 17. Mosaic of calculated length coefficients

По 4й форме потери устойчивости получили параметр чувствительности для крайних колонн среднего этажа равным 1. (рис. 18), при этом, коэффициент свободной длины в ПК Лира САПР $L_y=7,65$, представленный на рис. 19.

Таким образом, коэффициент расчетной длины для крайних колонн среднего этажа равняется:

$$\mu = \frac{7,65 \cdot 0,33}{3,3} = 0,765$$

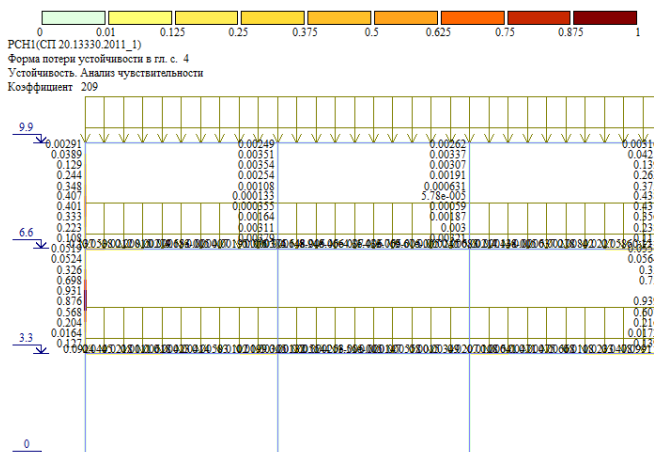


Рис. 18. Мозаика параметров чувствительности
 Fig. 18. Mosaic of sensitivity parameters

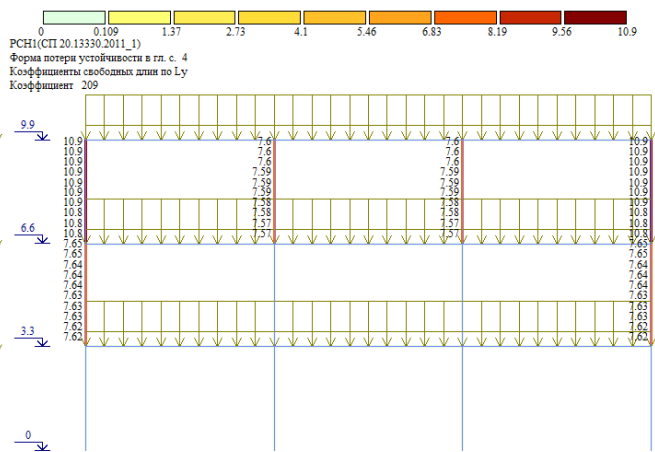


Рис. 19. Мозаика коэффициентов расчетной длины
 Fig. 19. Mosaic of calculated length coefficients

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета коэффициентов расчетной длины вручную, и сравнительный анализ с результатами расчета в программе «Кристалл» представлен в табл. 1, сравнительный анализ с результатами расчета в ПК Лира САПР 2016R5 представлен в табл. 2.

Таблица 1. Сравнительный анализ расчета вручную и в программе «Кристалл»
Table 1. Comparative analysis of the calculation manually and in the "Crystal" program

| Вид конструкции | Ручной расчет по СП 16.13330.2017 (без учета разнонагруженности) | Ручной расчет с учетом разнонагруженности | Расчет в программе «Кристалл» | Разница с ручным расчетом без учета разнонагруженности | Разница с ручным расчетом при учете разнонагруженности |
|--------------------------------|--|---|-------------------------------|--|--|
| Крайние колонны нижнего этажа | 1,53 | 1,88 | 1,532 | <1% | -18,5% |
| Средние колонны нижнего этажа | 1,53 | 1,32 | 1,532 | <1% | +13,9% |
| Крайние колонны среднего этажа | 2,51 | 3,0 | 2,507 | <1% | -16,4% |
| Средние колонны среднего этажа | 2,51 | 2,17 | 2,507 | <1% | +13,4% |
| Крайние колонны верхнего этажа | 2,11 | 2,6 | 2,111 | <1% | -18,8% |
| Средние колонны верхнего этажа | 2,11 | 1,82 | 2,111 | <1% | +13,8% |

Таблица 2. Сравнительный анализ расчета вручную и в ПК Лира САПР 2016R5
Table 2. Comparative analysis of manual calculation and in PC Lira CAD 2016R5

| Вид конструкции | Ручной расчет по СП 16.13330.2017 (без учета разнонагруженности) | Ручной расчет с учетом разнонагруженности | Расчет в ПК Лира САПР2016R5 | Разница с ручным расчетом без учета разнонагруженности | Разница с ручным расчетом при учете разнонагруженности |
|--------------------------------|--|---|-----------------------------|--|--|
| Крайние колонны нижнего этажа | 1,53 | 1,88 | 1,59 | +3,8% | -15,4% |
| Средние колонны нижнего этажа | 1,53 | 1,32 | 0,8 | -47,7% | -39,4% |
| Крайние колонны среднего этажа | 2,51 | 3,0 | 0,765 | -69,5% | -74,5% |
| Средние колонны среднего этажа | 2,51 | 2,17 | 0,86/1,06 | -65,7%/-57,8% | -60,4%/-51,2% |
| Крайние колонны верхнего этажа | 2,11 | 2,6 | 2,22 | +4,95% | -14,6% |
| Средние колонны верхнего этажа | 2,11 | 1,82 | 1,12 | -46,9% | -38,5% |

Как можно заметить из табл. 1, значение результатов коэффициентов расчетной длины, вычисленное вручную, без учета разнонагруженности колонн, и в программе «Кристалл» отличается во всех случаях менее чем на 1%. С учетом разнонагруженности разница в результатах колеблется от -18,8% до +13,9%. Однако результаты расчета показывают высокую эффективность применения программы «Кристалл», с возможностью уточнения коэффициентов для разных типов колонн путем учета разнонагруженности вручную.

Как видно по результатам табл. 2, при определении коэффициентов расчетной длины в ПК Лира САПР имеются сложности: для некоторых элементов значение коэффициентов имеет высокую сходимость со значениями, вычисленными вручную с учетом и без учета разнонагруженности (различие от -15,4% до +4,95%), для остальных элементов различие составляет от -38,5% до -74,5%. Это можно объяснить тем, что в нормах коэффициенты рассчитываются по упрощенным в запас формулам, не учитывающим продольные силы в колоннах, а также, различной логике определения коэффициентов в программе и вручную. Так как программа ищет наиболее неустойчивый стержень, и выдает справедливую расчетную длину лишь для него, для остальных стержней уточнять расчетные длины необходимо поиском комбинаций, при которых устойчивость теряют остальные, рассматриваемые стержни что и повышает трудоемкость и снижает корректность результатов.

В целом можно утверждать о возможности применения ПК Лира САПР для определения коэффициентов расчетной длины, однако, весомое различие в значениях, невозможность использования одной расчетной схемы без исключения элементов, для определения расчетных длин, а также результаты, зачастую зависящие от удачливости исключения элементов заставляют задуматься о корректности применения данного метода. В противовес можно сказать, что применение данных из программы «Кристалл» дает сопоставимые результаты с ручным расчетом, соответствие нормам, что не вызывает вопросов у экспертизы, а также снижение трудоемкости в области определения первоначальных значений коэффициентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования был выполнен расчет коэффициентов расчетной длины вручную, по таблицам СП 16.13330.2017, расчет в программе-сателлите SCAD Office «Кристалл», создана расчетная схема и выполнен расчет на устойчивость и определены коэффициенты расчетной длины для неустойчивых стержней в ПК Лира САПР.

В результате исследования была определена точность вычисляемых коэффициентов в программе «Кристалл» и соответствие вычисленных значений СП 16.13330.2017. Значение результатов коэффициентов расчетной длины, вычисленное вручную, без учета разнонагруженности колонн, и в программе «Кристалл» отличается во всех случаях менее чем на 1%. С учетом разнонагруженности разница в результатах колеблется от -18,8% до +13,9%.

Также была рассмотрена возможность расчета коэффициентов в ПК Лира САПР и сделаны следующие выводы:

- для определения верного значения расчетной длины стержня необходимо искать форму, в которой устойчивость всей системы будет зависеть от устойчивости исследуемого стержня;

- для определения расчетной длины всех стержней недостаточно одной общей расчетной схемы, необходимо искать и исключать различные элементы, для создания условий неустойчивости исследуемого стержня;

- значение расчетной длины для наиболее нагруженных и рядовых стержней различается, что соответствует формуле 146 СП 16.13330.2017;

- общая сходимость результатов ручного расчета и расчета в ПК Лира САПР версий 2016R5 и менее, на не высоком уровне, несмотря на близкие значения отдельных результатов. Для некоторых элементов значение коэффициентов имеет высокую сходимость со значениями, вычисленными вручную с учетом и без учета разнонагруженности (различие от -15,4% до +4,95%), для остальных элементов различие составляет от -38,5% до -74,5%.

- трудоемкость выполнения расчетов на устойчивость, для определения коэффициентов расчетной длины для каждого отдельного стержня и сомнительность получаемых результатов заставляют использовать более надежные и простые формулы таблицы 31 СП 16.13330.2017 или программы простого расчета, к примеру, «Кристалл».

В целом, можно сказать, что имеющиеся на данный момент, в версиях ПК Лира САПР 2016R5 и ранее, инструменты для определения расчетных длин, дают неоднозначные результаты, и в ходе проведенного исследования, закономерность их появления выявлена не была.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корноухов Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем. Упругие рамы, фермы и комбинированные системы // Издательство литературы по строительству: Москва. 1949. 378с.
2. Лейтес С.Д. Справочник по определению свободных длин элементов стальных конструкций // Издательство литературы по строительству: Москва. 1963. 162с.
3. Перельмутер А. В., Сливкер В. И., Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы: в 3 т. / Москва: Изд-во СКАД СОФТ, 2010. 24 с. ISBN 978-5-903683-08-6. EDN QJWLFL.
4. Pahl P.J. Introduction to the Stability of Frames: Lecture Notes. Stellenbosch University, March 2010.
5. Duan L., Chen W.F. Effective Length Factors of Compression Members: Structural Engineering Handbook / Chen Wai-Fah (Ed.). Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
6. Пешкова Е. В. Исследование устойчивости ветви стальной колонны и уточнение коэффициента расчетной длины // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 01–30 мая 2015. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2443-2446. EDN USRFGD.
7. Плотников Н. А. Оценка коэффициента расчетной длины стальных колонн в каркасных зданиях // Актуальные проблемы технического и технологического обеспечения инновационного развития: Сборник статей

по итогам Международной научно-практической конференции, Омск, 09 июля 2021. Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2021. С. 22-30. EDN VMFDOZ.

8. Иващенко А. М. Вариационный метод определения коэффициентов расчетных длин для колонн каркасов зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2006. № 6(570). С. 4-10. EDN HTUXXR.

9. Лапшин А.А. Численные исследования и анализ коэффициентов расчетных длин одноэтажных промзданий, оборудованных мостовыми кранами // Приволжский научный журнал. 2013. № 3(27). С. 55-61. EDN RBHKNL.

10. Солодов Н. В. Расчетная длина подкрановых ветвей сквозных стальных колонн из плоскости рамы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 3. С. 13-16. EDN VNUVMR.

11. Люфт Н. А. Корректное определение коэффициентов приведения длины сжатых стержней в расчетах ферм с жесткими узлами // Интеллектуальный потенциал Сибири: Сборник научных трудов. 30-я Региональная научная студенческая конференция, Новосибирск, 23–27 мая 2022. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2022. С. 598-601. EDN JQNDHT.

12. Хазов П.А. Экспериментальное исследование расчетных длин и коэффициентов продольного изгиба композитных труботонных образцов // Приволжский научный журнал. 2022. № 4(64). С. 16-26. EDN GIHYOB.

13. Пешкова Е. В. Уточнение коэффициента расчетной длины из плоскости рамы для сквозных колонн // Образование, наука, производство, Белгород, 20–22 октября 2015. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 2517-2521. EDN VNPIKR.

14. Горохов Е. В. Учет конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий // Металлические конструкции. 2016. Т. 22, № 3. С. 125-137. EDN WXDIKD.

15. Ляхович Л. С. Роль парадоксов в оценке корректности расчетных моделей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 2(39). С. 121-131. EDN QBVCCH.

ОБ АВТОРАХ

Кирилл Витальевич Парасюк – студент. Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДонНАСА), 286123, Россия, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2. E-mail: kir19072001@mail.ru

Станислав Федорович Дьяков – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: dyakov_sf@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Kirill V. Parasyuk – student. Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNASA). 286123, Russia, Donetsk People's Republic, Makeyevka, Derzhavina str. 2. E-mail: kir19072001@mail.ru

Stanislav F. Dyakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: dyakov_sf@spbstu.ru

УДК 624.014

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОФРО-БАЛОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРОВ ГОФРИРОВАНИЯ СТЕНКИ

М.С. Захаркевич

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Металлоемкость является одной из важных задач в современном строительстве, поэтому в 30-х годах прошлого века были предложены первые варианты гофрированных конструкций, которые позволяют снизить расход стали, не теряя при этом прочностных характеристик. В 1960-е годы гофрированные балки стали частью стальных каркасов и использовались в европейских городах. Позже, в 1980-х годах, эти балки стали широко применяться для строительства автомобильных мостов в Японии и Европе. В данной работе приводится исследование напряженно-деформированного состояния двутавровой стальной балки с тонкой поперечно-изогнутой стенки в зависимости от размеров гофрирования стенки. Расчет балок при различных вариантах гофрирования был проведен численным методом конечных элементов с помощью ПК «Ansys». Сравнение результатов расчетов гофро-балок при разных параметрах гофрирования показало, что наибольшего эффекта увеличения прочности и общей устойчивости можно добиться при изменении высоты гофра. При заданных исходных данных оптимальным является соотношение $f/l=0,2$, так как при нем соблюдается достаточное обеспечение запаса свойств первой и второй групп предельных состояний.

Ключевые слова: двутавры с гофрированной стенкой, рамные каркасы, гофро-балка, применение гофрированных балок, современное строительство, численное моделирование, оптимизация сечения, металлоемкость, устойчивость.

Ссылка для цитирования: Захаркевич М.С. Напряженно-деформированное состояние гофро-балок в зависимости от размеров гофрирования стенки // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 34-42. EDN: PJESPH.

STRESS-STRAIN STATE OF CORRUGATED BEAMS DEPENDING ON THE SIZE OF THE WALL CORRUGATION

M.S. Zaharkevich

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Metal intensity is one of the important challenges in modern construction, so in the 1930s the first variants of corrugated structures were proposed to reduce steel consumption without losing strength properties. In the 1960s, corrugated beams became part of steel frames and were used in European cities. Later, in the 1980s, these girders were widely used for highway bridge construction in Japan and Europe. This paper presents a study of the stress-strain state of I-beam steel girder with thin transversely curved wall as a function of wall corrugation dimensions. The calculation of beams at different variants of corrugation was carried out by numerical finite element method with the help of PC "Ansys". Comparison of the results of calculations of corrugated beams at different parameters of corrugation showed that the greatest effect of increasing the strength and overall stability can be achieved by changing the height of the corrugation. At the given initial data the ratio $f/l=0,2$ is optimal, as it provides sufficient safety margin of properties of the first and second groups of limit states.

Keywords: I-beams with a corrugated wall, frame frames, sin-beam, the use of corrugated beams, modern construction, numerical modeling, optimization of the section, metal consumption, stability.

For citation: Zaharkevich M.S. Stress-strain state of corrugated beams depending on the size of the wall corrugation // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 34-42. EDN: PJESPH.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом данного исследования является стальная двутавровая балка с тонкой поперечно-гофрированной стенкой.

Впервые варианты гофрированных конструкций были предложены в 30-х годах прошлого века в Уральском политехническом институте [1]. Применение и расчет гофрированных профилей были предложены такими учеными как В.Н. Горновым, Г.А. Ажермачевым, В.Ф.Кириленко [2], Я.И. Ольковым, А.Н. Степаненко [3] и др.

Важной задачей при конструировании гофро-балок является подбор наиболее оптимальных параметров гофрирования конструкции. Например, в работе А. Н. Степаненко [3], приведено оптимальное соотношение высоты полуволны гофра к его длине, равное $\frac{f}{l} = 0,2 \dots 0,6$. Это соотношение определено математическим трехфакторным экспериментом с использованием метода Д. Брандона, как наиболее значимое при подборе сечения.

В настоящее время наибольший вклад в исследование расчетов гофрированных конструкций вносит ЦНИИПСК им. Мельникова. Под руководством С.А. Макеева проведено множество экспериментов, на которых основаны численные исследования гофро-балок. Так, в статье, где авторами были С.А. Макеев, Н.Г. Силина, А.А. Комлев [4] представлена конструкция стенда и методика определения общей устойчивости гофро-балок. С помощью этого экспериментального стенда были доказаны значения критических нагрузок общей потери устойчивости, полученных численными методами.

В работе, автором которой является Н.Г.Силина [5], показано влияние высоты гофр стенки балки на общую устойчивость гофро-балок с синусоидальной стенкой.

Стоит отметить, что в большинстве написанных работ авторы подтверждают снижение металлоёмкости и повышение прочностных характеристик конструкций при применении гофрированных профилей [6-12].

Таким образом, предметом данного исследования является напряженно-деформированное состояние гофро-балок при различных соотношениях гофрирования стенки.

Цель исследования заключается в определении оптимальных параметров гофрирования стенки в зависимости от напряженно-деформированного состояния балки, которое определено с помощью численного метода конечных элементов.

Задачи исследования представляют собой:

- моделирование стальной балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой в ПК «Ansys».
- определение напряженно-деформированного состояния гофро-балок, в зависимости от высоты полуволны гофра;
- определение напряженно-деформированного состояния гофро-балок, в зависимости от длины полуволны гофра;
- сравнение и анализ полученных результатов;
- заключение и выбор оптимальных параметров гофрирования стенки.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ СЕЧЕНИЙ

На рис. 1 представлена принятая расчетная схема, которая представляет собой шарнирно-опертую балку длиной $l=6$ м с равномерно-распределенной нагрузкой, равной $q=8,4$ кН/м. В качестве материала изготовления конструкции выбрана сталь С255 с расчетным сопротивлением $R_y=250000$ кН/м².

Так как сечение балки переменное по длине, необходимо выделить два наиболее характерных сечения:

- сечение №1 – проходящее по вершине гофра;
- сечение №2 – проходящее в месте совмещения оси стенки с осью балки.

Параметры сечений показаны на рис. 2, размеры приведены в таблицах 1-2.

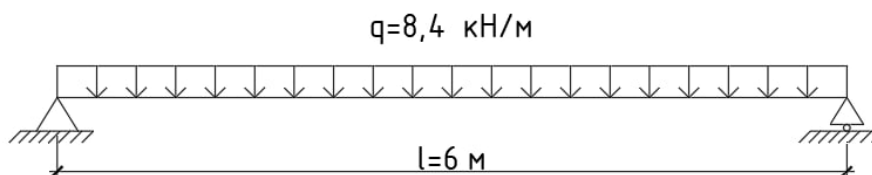


Рис. 1. Расчетная схема
Fig. 1. Design scheme

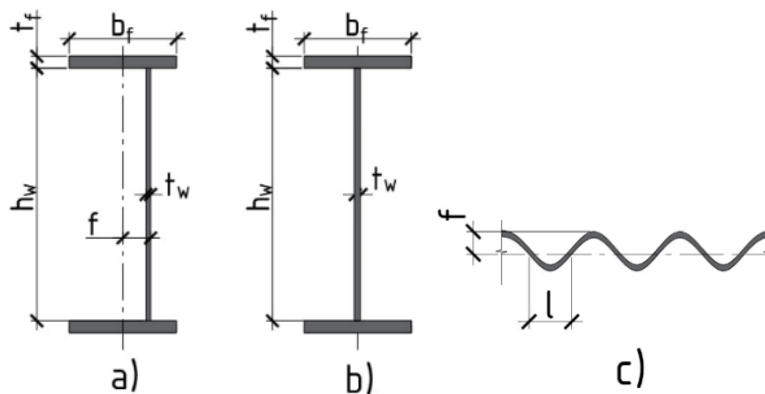


Рис.2. Параметры профиля: а - сечение №1; б - сечение №2; в - параметры гофрирования
Fig. 2. Profile parameters: a - section №1; b - section №2; c - corrugation parameters

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТенок И ЖЕСТКОСТИ ГОФРО-БАЛОК

Устойчивое состояние волнистой стенки можно описать известным в теории упругости тонкостенных пластин условием (1):

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{cr,0}} + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{cr,0}} \right)^2 \leq 1 \quad (1)$$

где σ_s - среднее по высоте рассматриваемого участка стенки сжимающее напряжение, вызванное местной погонной нагрузкой (2):

$$\sigma_s = \frac{q}{2 \cdot t_w} = \frac{8,4}{2 \cdot 0,002} = 2100 \frac{\kappa H}{M^2} = 2,1 МПа \quad (2)$$

τ_s – действующее на участке стенки сдвигающее напряжение, вызываемое поперечным усилием;

$\sigma_{cr,0}$ и $\tau_{cr,0}$ - критические напряжения «общей» устойчивости волнистой стенки, зависящие от D_x , D_z , D_{xz} – жесткостей гофрированной пластинки по направлениям сторон и приведенной ее жесткости;

Для практического использования удобно представить в виде (3-4):

$$\sigma_{cr,0} = k_{\sigma,0} \cdot E \cdot \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (3)$$

где $k_{\sigma,0}$ – коэффициент влияния размеров гофров на величину критических сжимающих напряжений;

E – модуль упругости стали ($E = 206000$ МПа);

t_w – толщина стенки;

h_w – высота стенки.

$$\tau_{cr,0} = k_{\tau,0} \cdot E \cdot \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (4)$$

где $k_{\tau,0}$ – коэффициент влияния размеров гофров на величину критического сдвигающего усилия;

E – модуль упругости стали ($E = 206000$ МПа);

t_w – толщина стенки;

h_w – высота стенки.

Жесткость балки регламентируется его максимальным прогибом от нормативных нагрузок, который не должен превышать предельного, равного (5):

$$f_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{6}{250} = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм} \quad (5)$$

где L – длина балки.

НДС ГОФРО-БАЛОК ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ВЫСОТЫ ПОЛУВОЛНЫ ГОФРА

На рис. 3 представлен общий вид численных моделей шарнирно-опертых балок, с разной высотой полуволны гофра. Шаг сетки конечных элементов сетки равен 20 мм (рис. 4). Расчет был выполнен в упругой постановке задачи.

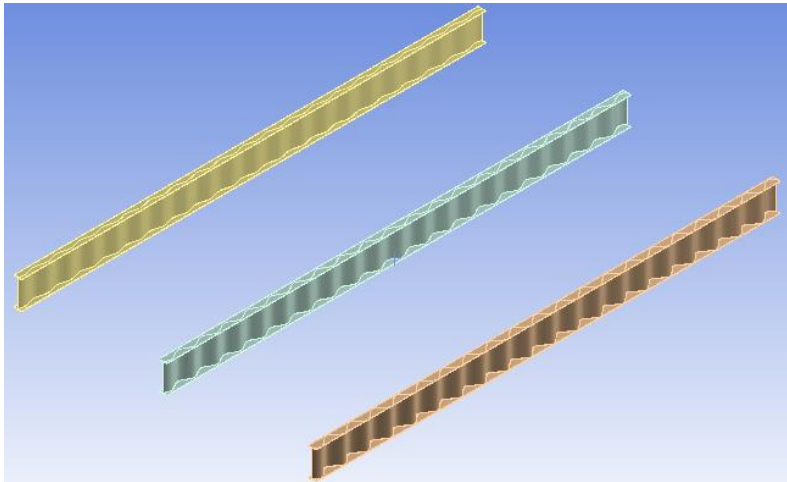


Рис. 3. Общий вид балок
 Fig. 3. General view of the beams

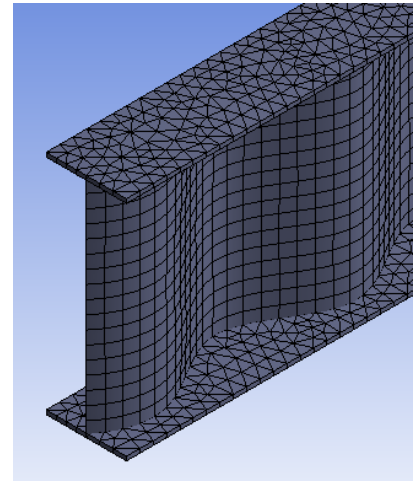


Рис. 4. Фрагмент численной модели
 Fig. 4. Fragment of the numerical model

Таблица 1. Параметры сечений при варьировании высоты полуволны гофра.
 Table 1. Sections parameters when varying the height of the half-wave of the corrugation

| № | Высота полуволны гофра f , мм | Длина полуволны гофра l , мм | Соотношение высоты полуволны гофра к его длине f/l | Высота стенки h_w , мм | Толщина стенки t_w , мм | Ширина полка b_f , мм | Толщина полка t_f , мм |
|---|---------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 15 | 150 | 0,1 | 350 | 2 | 120 | 6 |
| 2 | 30 | | 0,2 | | | | |
| 3 | 45 | | 0,3 | | | | |

Наибольшие значения нормальных напряжений наблюдаются в образце с высотой полуволны гофра $f=15$ мм в пролетном сечении №1 в точке наибольшего свеса полки (рис.5), Максимальное значение касательных напряжений наблюдается в опорном сечении в образце с $f=15$ мм (рис.6).

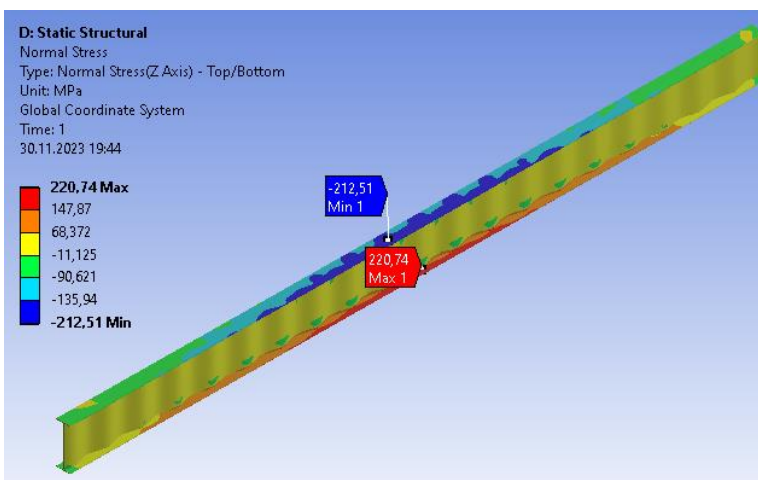


Рис. 5. Максимальные и минимальные нормальные напряжения σ_z в пролетном сечении с наибольшим свесом
 Fig. 5. Maximum and minimum normal stresses σ_z in the span section with the greatest overhang

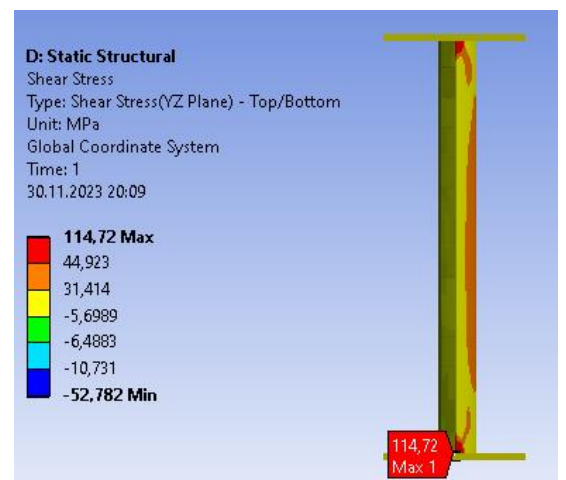


Рис.6. Максимальные значения касательных напряжений τ_s в опорном сечении
 Fig. 6. Maximum tangent values stress τ_s in the support section

На рис. 7 представлены максимальные значения деформаций, наибольшее значение наблюдается в образце с высотой полуволны $f=15$ мм. Расчет на устойчивость показал, что наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости наблюдается в балке с наименьшей высотой полуволны гофра, который составляет 1,2132 (рис.8).

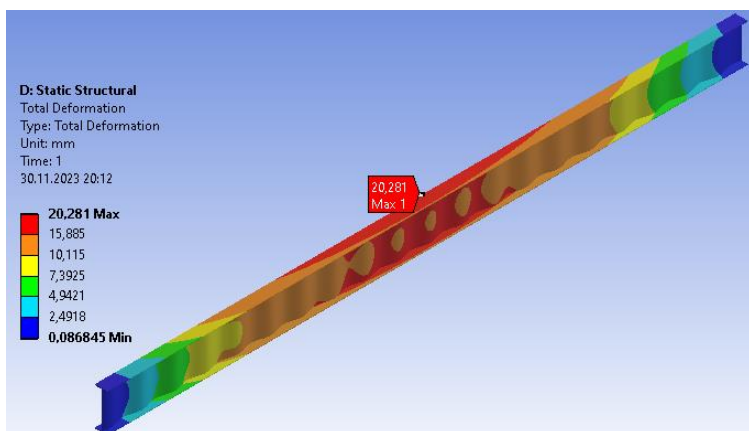


Рис. 7. Максимальные значения деформаций в пролетном сечении
Fig. 7. Maximum values of deformations in the span section

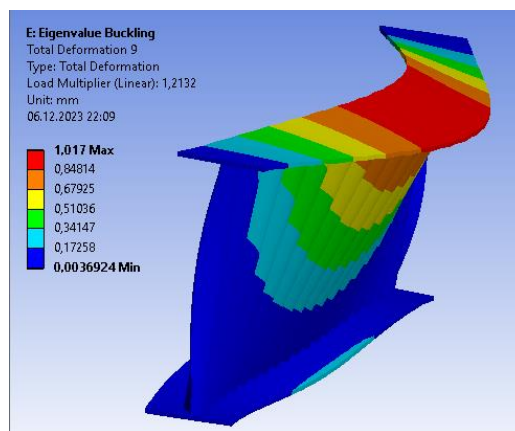


Рис. 8. Форма потери общей устойчивости
Fig. 8. Form of loss of general stability

Результаты расчета при варьировании высоты полуволны гофра представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета при варьировании высоты полуволны гофра
Table 2. Calculation results for varying the height of the half-wave corrugation

| № | Высота полуволны гофра f , мм | Коэффициент потери общей устойчивости | Соблюдение условия местной устойчивости, % | Запас жесткости, % | Металлоемкость 1 м.п., кг. |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 1 | 15 | 1,21 | 74,36 | 15,49 | 16,92 |
| 2 | 30 | 1,55 | 87,99 | 29,22 | 17,00 |
| 3 | 45 | 1,71 | 92,04 | 30,70 | 17,85 |

Исходя из результатов расчета, можно сделать вывод о том, что при увеличении высоты полуволны гофра наблюдается увеличение запаса жесткости, общей устойчивости и почти исключается возникновение местной потери устойчивости в стенке. Однако, увеличивается вес конструкции.

НДС ГОФРО-БАЛОК ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ДЛИНЫ ПОЛУВОЛНЫ ГОФР

Численные модели шарнирно-опертых балок, с разной длиной полуволны изображены на рис. 9. Шаг сетки конечных элементов равен 20 мм. Расчет был выполнен в упругой постановке задачи. Параметры сечений приведены в табл. 3.

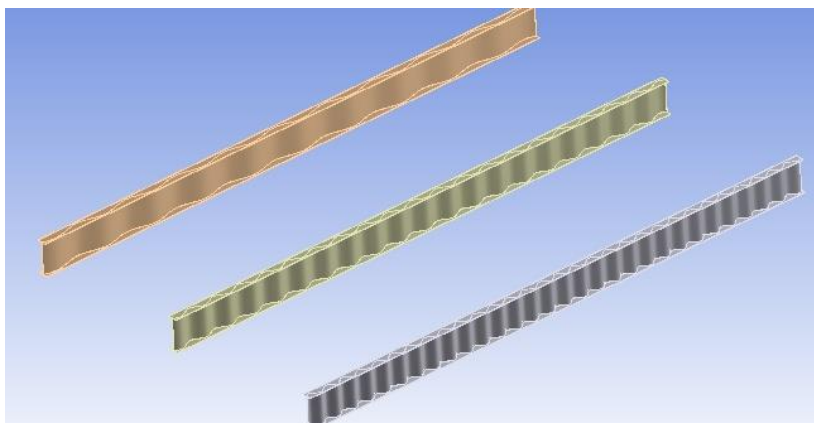


Рис. 9. Общий вид балок
Fig. 9. General view of the beams

Таблица 3. Параметры сечений при варьировании длины полуволны гофра
Table 3. Sections parameters when varying the length of the half-wave of the corrugation

| № | Длина полуволны гофра l , мм | Высота полуволны гофра f , мм | Соотношение высоты полуволны гофра к его длине f/l | Высота стенки h_w , мм | Толщина стенки t_w , мм | Ширина полок b_f , мм | Толщина полок t_f , мм |
|---|--------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 300 | 30 | 0,1 | 350 | 2 | 120 | 6 |
| 2 | 150 | | 0,2 | | | | |
| 3 | 100 | | 0,3 | | | | |

Наибольшие значения нормальных напряжений наблюдаются в образце с длиной полуволны гофра $l=300$ мм в пролетном сечении №1 в точке наибольшего свеса полки (рис.10), Максимальное значение касательных напряжений наблюдается в опорном сечении в образце с $l=100$ мм (рис.11).

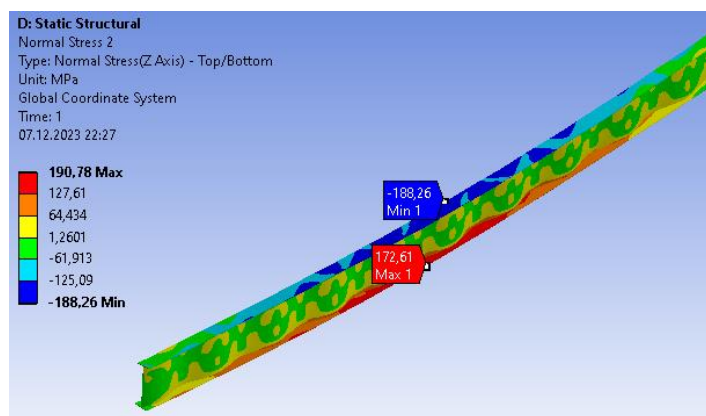


Рис. 10. Максимальные и минимальные нормальные напряжения σ_z в пролетном сечении с наибольшим свесом
Fig. 10. Maximum and minimum normal stresses σ_z in the span section with the greatest overhang

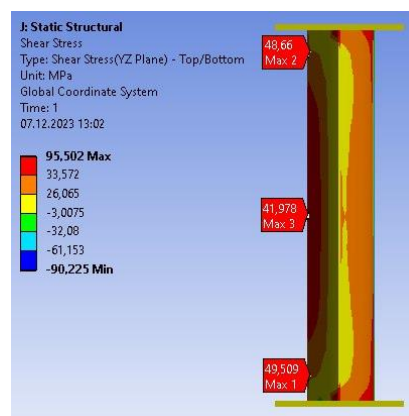


Рис.11. Максимальные значения касательных напряжений τ_s в опорном сечении
Fig. 11. Maximum tangent values stress τ_s in the support section

На рис.12 представлены максимальные значения деформаций, наибольшее значение наблюдается в образце с длиной полуволны $l=100$ мм. Расчет на устойчивость показал, что наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости наблюдается в балке с наименьшей длиной полуволны гофра, который составляет 1,3249 (рис.13).

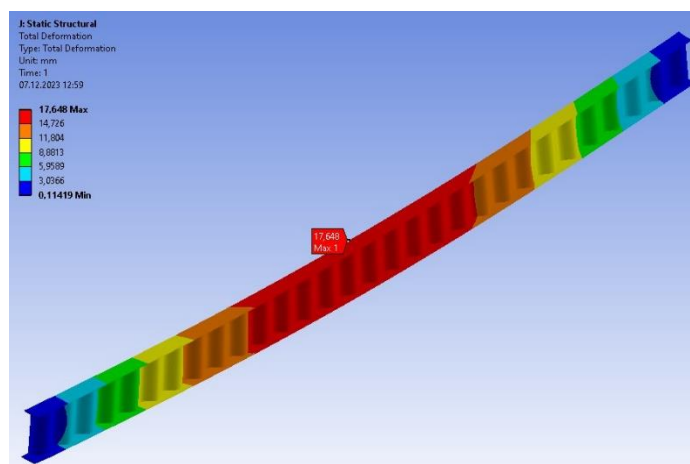


Рис. 12. Максимальные значения деформаций в пролетном сечении
Fig. 12. Maximum values of deformations in the span section

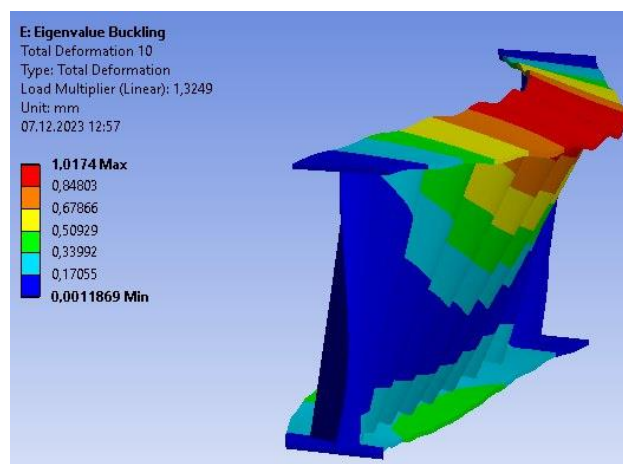


Рис. 13. Форма потери общей устойчивости
Fig. 13. Form of loss of general stability

Результаты расчета при варьировании длины полуволны гофра представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета при варьировании длины полуволны гофра
Table 4. Calculation results when varying the length of the half-wave corrugation

| № | Длина полуволны гофра l , мм | Коэффициент потери общей устойчивости | Соблюдение условия местной устойчивости, % | Запас жесткости, % | Металлоемкость 1 м.п., кг. |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 1 | 300 | 1,32 | 88,07 | 29,98 | 16,92 |
| 2 | 150 | 1,55 | 87,99 | 29,22 | 17,00 |
| 3 | 100 | 1,61 | 94,37 | 27,46 | 17,85 |

По результатам, приведенным в таблице 4, можно сделать вывод о том, что увеличение частоты гофрирования позволяет увеличить запас прочности, общей и местной устойчивости, при этом деформации в конструкциях возрастают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы, основанные на расчетах:

1. Распределение напряжений для всех образцов одинаково.
2. Сравнение результатов расчетов гофро-балок при разных параметрах гофрирования показало, что наибольший вклад в обеспечение устойчивости вносит значение высоты полуволны гофра, по сравнению с длиной, так как:

- запас общей устойчивости увеличился на 50%, по сравнению с 29% (рис.14);

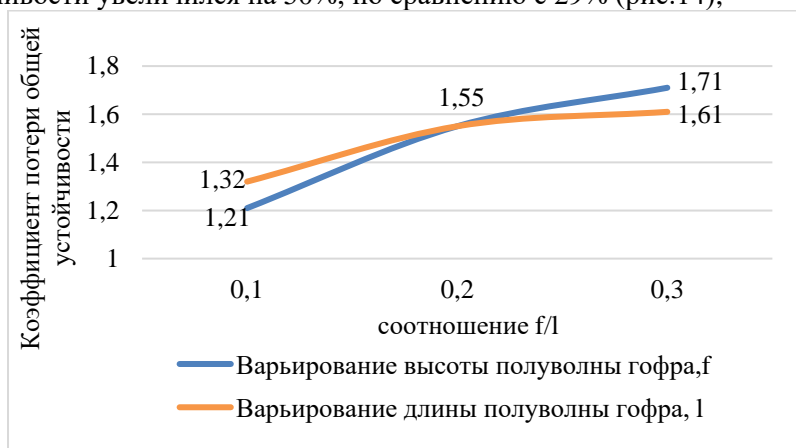


Рис.14. График зависимости коэффициента потери общей устойчивости гофро-балок от размеров гофрирования стенки

Fig. 14. Graph of the dependence of the coefficient of loss of overall stability of corrugated beams on the size of the wall corrugation

- увеличение запаса местной устойчивости стенки составило 17,68 % по сравнению с 6,3 % (рис. 15);

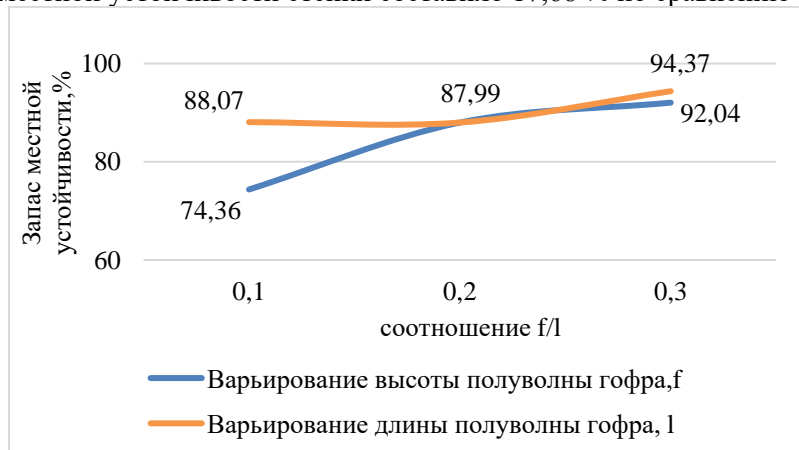


Рис.15. График зависимости местной устойчивости стенок гофро-балок от размеров гофрирования стенки

Fig. 15. Graph of the dependence of the local stability of the walls of corrugated beams on the size of the wall corrugation

3. При увеличении частоты гофрирования стенки наблюдается увеличение деформаций в балке (рис.16).

4. При увеличении высоты полугофра наблюдается уменьшение деформаций в балке (рис.16).

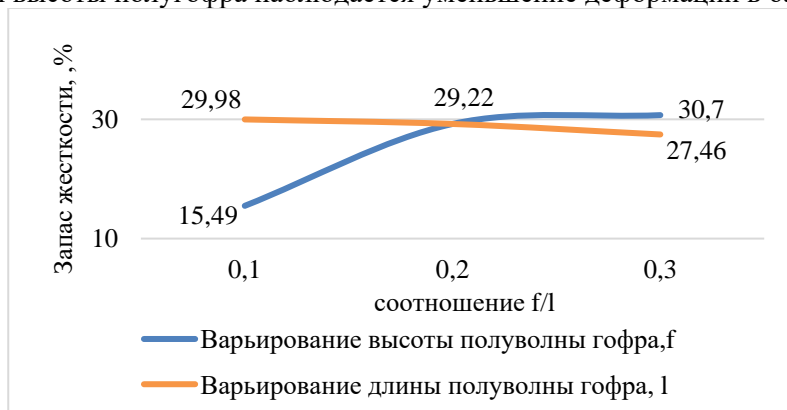


Рис.16. График зависимости запаса жесткости гофро-балок от размеров гофрирования стенки гофрирования стенки

Fig. 16. Graph of the dependence of the margin of rigidity of corrugated beams on the size of the corrugation of the wall

5. Для заданных исходных данных наиболее оптимальным является соотношение $f/l=0,2$, так как при нем соблюдается достаточное обеспечение запаса свойств первой и второй групп предельных состояний. Результаты данной работы:

- было выполнено моделирование стальных гофро-балок с тонкой поперечно-гофрированной стенкой в ПК «Ansys».
- определено напряженно-деформированное состояние гофро-балок, в зависимости от высоты полуволны гофра;
- определено напряженно-деформированное состояние гофро-балок, в зависимости от длины полуволны гофра
- был выполнен анализ полученных результатов, который показал, что наиболее оптимальным соотношением параметров стенки является $f/l=0,2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. № 6. С. 676–687. DOI:10.22227/1997-0935.2021.6.676-687. EDN: XDBUIJ.
2. Кириленко В.Ф., Окрайнец Г.А. К вопросу расчета балок с гофрированной стенкой//Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1969. №4. С.23-27
3. Степаненко А. Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой: учебное пособие. – Хабаров. гос. техн. ун-та, 1999. 115 с
- 4.Макеев С.А., Силина Н.Г., Комлев А.А. Экспериментальный стенд и методика испытаний гофробалок на общую устойчивость // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 378–383. EDN: RDIZLG.
- 5.Силина Н.Г. Влияние параметров стенки на общую устойчивость гофробалок // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ». 2021. С. 589-591. EDN: ALETZT.
6. Брянцев А.А., Абсиметов В.Э., Лалин В.В. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях // Строительство Уникальных Зданий И Сооружений. 2017. № 54(3). С. 93–104. DOI:10.18720/CUBS.54.8. EDN: YSPKZR
7. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Технические науки. Строительство. 2015. № 4(15). С. 132–138. EDN: VHDRER.
8. Соболев Ю.В., Рыбкин И.С. Конструкционный анализ гофрированных металлических изгибаемых элементов // Вестник МГСУ. 2007. № 3. С. 144–148. EDN: MVGZWN.
9. Серпик И.Н., Балабин П.Ю. Снижение материалоемкости стальных рам без сокращения резерва несущей способности конструкций // Строительство и реконструкция. 2015. № 62(6). С. 66–74. EDN: VBTQQV.

10. Мартынюк А.Я., Нилов А.А., Лазнюк М.В. Сварные соединения элементов двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Металлические конструкции. 2008. № 4. С. 237–244.

11. Erdal F., Tunca O., Doğan E. Optimum Design of Composite Corrugated Web Beams Using Hunting Search Algorithm // International Journal Of Engineering & Applied Sciences. 2017. № 2(9). P. 156–156. DOI:10.24107/ijeas.32363311.

12. Макеев С. А., Сирина Н.Г., Соколовский З.Н. Разработка и апробация математической модели пространственного деформирования гофробалок // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 18–25. DOI:10.33622/0869-7019.2021.04.18-25. EDN: KWOIKD

ОБ АВТОРАХ

Мария Сергеевна Захаркевич – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: mariazaharkevich@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Maria S. Zaharkevich – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: mariazaharkevich@yandex.ru

УДК 69.0 (075.8)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МНОГОПРОФИЛЬНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

А.К. Княжищева

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В рамках общенациональной цифровизации строительной отрасли России, актуальным является внедрение технологий информационного моделирования во все направления деятельности строительных организаций, в том числе в производственную. В современной экономической литературе и нормативно-законодательных актах, регулирующих аналитическую практику, отсутствует единый методический подход к построению системы показателей, комплексно характеризующих результаты деятельности многопрофильных строительных организаций. В статье представлен алгоритм проведения оценки и теорико-методический подход к выделению областей эффективности, построению системы показателей оценки внедрения информационного моделирования, представлены способы расчетов и анализа результатов для многопрофильной организации, осуществляющей деятельность в проектно-строительном и производственном направлении по изготовлению бетонных строительных конструкций. Результаты реализации методики на практическом примере позволяют сделать вывод о том, что внедрение технологий информационного моделирования в производственную область многопрофильной строительной организации имеют значительные преимущества и обладает высокой практической значимостью.

Ключевые слова: эффективность, комплексная оценка эффективности, показатели эффективности, технологии информационного моделирования, многопрофильная строительная организация.

Ссылка для цитирования: Княжищева А.К. Методика оценки эффективности внедрения технологий информационного моделирования в многопрофильной строительной организации // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 43-51. EDN: XKYXKC.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF IMPLEMENTING INFORMATION MODELING TECHNOLOGIES IN A MULTIDISCIPLINARY CONSTRUCTION ORGANIZATION

A. K. Knyazhishcheva

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. As part of the nationwide digitalization of the construction industry in Russia, it is relevant to introduce information modeling technologies in all areas of activities of construction organizations, including production. In modern economic literature and normative-legislative acts regulating analytical practice, there is no unified methodological approach to building a system of indicators that comprehensively characterize the performance of multi-profile construction organizations. The article presents the algorithm of evaluation and theoretical and methodological approach to the allocation of areas of effectiveness, construction of a system of evaluation indicators of the implementation of information modeling, presents the methods of calculations and analysis of results for a multidisciplinary organization operating in the design and construction and production of concrete building structures. The results of the methodology implementation on a practical example allow us to conclude that the implementation of information modeling technologies in the production area of a multidisciplinary construction organization has significant advantages and has a high practical significance.

Keywords: efficiency, integrated efficiency assessment, efficiency indicators, information modeling technologies, multidisciplinary construction organization.

For citation: Knyazhishcheva A. K. Methodology for assessing the effectiveness of implementing information modeling technologies in a multidisciplinary construction organization // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 43-51. EDN: XKYXKC.

ВВЕДЕНИЕ

Принципиально новый подход в архитектурно-строительном проектировании – это BIM технологии, ставшие ответной реакцией на кардинально изменившиеся условия и ритм жизни, при которых практически невозможно эффективно обрабатывать прежними методами возросший в сотни раз (и неуклонно растущий) поток информации, предваряющий и сопровождающий процесс проектирования и строительства в целом.

Подход к оценке эффективности технологий информационного моделирования подразумевает многоступенчатый процесс, в котором важно уделить особое внимание сферам деятельности предприятия. В исследовании предлагается общий подход оценки эффективности работы многопрофильной строительной организации ООО «БЛОКЭТАЛОН ГРУПП», осуществляющей проектную, строительную и производственную деятельность с использованием цифровых технологий, в том числе ТИМ (BIM). Производство строительных конструкций (блоки стеновые, пазогребневые мегаблоки, стеновые панели, перемычки, армопоясы) сопровождается полной оцифровкой технических и конструктивных решений посредством ТИМ (BIM) уже на стадии разработки и изготовления таких конструкций. Параметризованные трехмерные модели («семейства», с данными о геометрических, физических и функциональных характеристиках конструкций имеют высокий уровень проработки моделей конструкций (LOD 400)), что позволяет использовать их на всех этапах жизненного цикла строительного объекта в проектной, рабочей и исполнительной документации, в том числе на стадиях строительства, эксплуатации, реконструкции и демонтажа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Научную основу исследования составили работы российских ученых в области теорий экономического развития, стратегий управления научно-техническими нововведениями [1-6], теоретико-методические подходы к оценке эффективности инноваций в деятельности организаций [7-13], зарубежные научные труды в области внедрения и применения BIM [14-17], а также системно-целевой подход.

Успех деятельности организации зависит от качества принимаемых управленческих решений [2]. Основой для объективного понимания происходящих в организации процессов являются качественные и количественные показатели деятельности, полученные в ходе расчетов и их анализа. Однако, отдельные показатели имеют свою ограниченность и не могут быть использованы для всесторонней оценки. Только система показателей позволяет реально оценить деятельность организации, учитывая воздействие различных факторов [12-13].

Для достижения результативности в оценке новых технологий важно использовать комплексный подход, содержащий систематизированную оценку конкретных показателей, согласно научным трудам авторов [1-4]. Комплексный подход для объективной оценки эффективности должен начинаться с определения областей эффективности и выделения конкретных показателей эффективности. Следующим важным шагом является определение способа оценки показателей, связь математики и анализа необходима для изучения и получения результатов. Далее, важным шагом будет выявление негативных и позитивных сторон внедрения ТИМ (BIM) с последующими общими выводами по результатам внедрения технологий информационного моделирования. Разработка и реализация мероприятий по повышению эффективности работы компании проводится после каждой контрольной оценки ее деятельности, в результате чего формируются корректировки по проекту внедрения и использования ТИМ (BIM) технологий. На рис. 1 представлен общий алгоритм проведения оценки эффективности, обеспечивающий комплексный подход.



Рис. 1. Общий алгоритм оценки эффективности внедрения ТИМ (BIM)
Fig. 1. General algorithm for assessing the effectiveness of BIM

В табл. 1 выделим области оценки эффективности и определим показатели внедрения технологии ТИМ (BIM), которые отразят результативные характеристики процессов в организации.

Таблица 1. Области, показатели эффективности и методы оценки внедрения технологии ТИМ (BIM)
Table 1. Areas, performance indicators and methods of evaluation of BIM technology implementation

| Область эффективности | Характеристика области | Показатели эффективности | Способ оценки |
|-----------------------|--|---|--|
| Функциональная | Степень достижения стратегических целей цифровизации предприятия | 1. Оценка стратегической позиции и уровня конкурентного преимущества организации. 2. Анализ внешней среды организации. 3. Анализ внутренней среды организации. 4. Оценка условий развития организации. 5. Степень соответствия поставленных стратегических целей интересам стейкхолдеров (основных участников) проектов. 6. Оценка стратегической устойчивости и эффективности. Оценка стратегической гибкости. 7. Оценка степени выполнения текущих обязательств. 8. Оценка управленческой деятельности. 9. Оценка качества продукции и услуг. 10. Эффективность реализации по отдельным проектам и др. | Трендовый анализ (сравнение фактических показателей с плановыми, сравнение значений отдельных показателей за несколько периодов), сравнительный и факторные анализы с целью определения причин отклонений значений отчетных периодов с данными прошлых периодов или планами на отчетный период. Метод экспертных оценок. |

| Область эффективности | Характеристика области | Показатели эффективности | Способ оценки |
|-----------------------|---|--|---|
| Экономическая | Степень затратности ресурсов на цифровизацию предприятия | Расчет основных показателей экономической эффективности: 1. Чистый приведенный доход. 2. Индекс (коэффициент) доходности. 3. Период окупаемости (дисконтированный). 4. Внутренняя норма доходности. 5. Индекс (коэффициент) рентабельности. 6. Период окупаемости (не дисконтированный). | Статистические и дисконтные методы расчета. Далее возможны трендовый, структурный, сравнительный и факторный анализы и др. |
| Ресурсная | Влияние внедрения ВИМ на использование природных ресурсов, также временных и трудовых затрат, получающих стоимостную оценку | 1. Эффективность использования трудовых ресурсов. 2. Эффективность использования производственных фондов. 3. Эффективность использования финансовых ресурсов и др. | Трендовый, структурный, сравнительный и факторный анализы и др. |
| Экологическая | Степень сохранения и воспроизводства окружающей природной и энергетической среды | 1. Экономия энергетических ресурсов за счет оптимизации внутренних трудовых, временных и производственных затрат. 2. Сортировка отходов. 3. Утилизация отходов. 4. Вторичное использование ресурсов. 5. Удельное накопление отходов на территории производства и отдельных строительных площадках. 6. «Зеленые» закупки и др. | Оценка нормативных показателей экологической эффективности. Метод экспертных оценок. Метод сумм (прирост оценочных показателей) и др. |
| Научно-техническая | Прирост научных и технических разработок | 1. Научно-информационный уровень предприятия. 2. Коэффициент накопления опыта информационного моделирования. 3. Коэффициент конкурентоспособности продукции предприятия. 4. Коэффициент обновления технологии информационного моделирования. 5. Коэффициент обновления технологии производства. | Трендовый анализ. Метод балльной оценки. Метод сумм (прирост оценочных показателей) и др. |
| Финансовая | Выраженная в финансовых показателях способность внедренных технологий генерировать денежный поток в течении максимально длительного периода времени | 1. Коэффициент автономии. 2. Коэффициент текущей ликвидности. 3. Коэффициент критической ликвидности. 4. Коэффициент абсолютной ликвидности. 5. Рентабельность активов. 6. Рентабельность собственного капитала. 7. Оборачиваемость активов предприятия. 8. Коэффициент маневренности. | Общий расчет финансовых показателей эффективности. Трендовый, структурный, сравнительный и факторный анализы и др. |

| Область эффективности | Характеристика области | Показатели эффективности | Способ оценки |
|-----------------------|--|---|--|
| Социальная | Влияние внедрения технологий на удовлетворение потребностей человека и общества, повышение уровня жизни и условий труда. | 1. Социальная ответственность предприятия. 2. Улучшение межличностного взаимодействия сотрудников. 3. Показатели прироста социальных связей и устойчивых связей с клиентами. 4. Показатели деловой активности. 5. Репутация предприятия и др. | Сравнительный анализ. Метод экспертных оценок. Метод сумм (прирост оценочных показателей) и др. |
| Производственная | Влияние BIM подхода на производственно направленные работы предприятия | 1. Издержкостоемость выпуска продукции. 2. Коэффициент конкурентоспособности продукции предприятия 3. Производительность труда, трудоемкость и выработка 4. Коэффициент обновления технологий 5. Удельный вес укрупненных статей затрат в себестоимости продукции. 6. Затраты на ремонт и содержание оборудования. 7. Затраты на сырье и материалы. | Расчет общих показателей, отражающих эффективность производственной деятельности компании. Метод экспертных оценок. Метод сумм (прирост оценочных показателей) и др. |

В табл. 1 представлен общий подход к систематизации показателей эффективности от внедрения ТИМ (BIM) в многопрофильной строительной организации с проектно-строительным и производственным направлениями деятельности. Отметим, что области оценки эффективности и сами показатели отражают специфику предприятия, а способы оценки выбраны, исходя из состава показателей.

С учетом специфики многопрофильной организации, как завода-изготовителя строительных конструкций, представим расчет показателей эффективности производственной области, на которые оказывают влияние ТИМ (BIM) технологии (табл. 2).

Таблица 2. Определение эффективности от внедрения технологии ТИМ (BIM) в производственной области
Table 2. Determination of efficiency from implementation of BIM technology in the production area

| № | Показатель | Метод оценки / Формула, обозначение | Характеристика |
|---|---|--|--|
| 1 | Коэффициент конкурентоспособности продукции предприятия | $K_{КП} = \frac{N_{ТОВ} - N_{ОСТ}}{N_{ТОВ}}$ где: N _{ТОВ} – объем товарной продукции предприятия, руб; N _{ОСТ} – объем товарной продукции, которая трудно поддается реализации, руб; K _{КП} – коэффициент конкурентоспособности продукции предприятия. | Чем ближе ККП к единице, тем выше конкурентоспособность продукции. Если К _{КП} близок к «0», то продукция не конкурентоспособна. Чем выше конкурентоспособность, тем выше спрос на продукцию и меньше потери от морального и физического старения продукции в пределах ее жизненного цикла. |
| 2 | Производительность труда | $P_{ТР} = \frac{П_{П}}{С_{ч}}$ где: П _П – продукция, произведенная за выделенный период, куб; С _ч – среднесписочная численность сотрудников за этот же период, чел; П _{ТР} – производительность труда; | С помощью производительности труда можно оценить, насколько эффективно используется труд работников. Формально коэффициент показывает количество трудовых затрат в пересчете на единицу продукции. |

| № | Показатель | Метод оценки / Формула, обозначение | Характеристика |
|---|-----------------------------------|---|---|
| 3 | Трудоемкость | $T = \frac{B}{O_{П}}$ где: В – время, затраченное на выпуск продукции; Оп – объем произведенного продукта; Т – трудоемкость. | Трудоемкость – это труд, который должен затратить работник на изготовление единицы продукции. |
| 4 | Выработка | $B_{сч} = \frac{П_{П}}{Ч_{ч}}$ где: Пп – объем произведенного продукта; Чч – число человеко-часов, для которых рассчитывается выработка; Всч – среднечасовая выработка. | Выработка – это объем работ в количественном или качественном выражении, выполненный одним работником в единицу времени. |
| 5 | Коэффициент обновления технологий | $K_{ОБН\ ВИМ} = \frac{П_{НТ}}{П_{ОБЩ\ Т}}$ где: Пнт – количество вновь введенных технологических процессов, ед; Побщ.т – общее количество технологических процессов, ед; Кобн.вим – коэффициент обновления технологий. | Данный показатель может быть использован для обоснования возможности производства высококачественной, конкурентоспособной продукции на базе передовой техники и технологии. |

Расчет проводился за 2022 и 2023 годы. В 2022 году использовались преимущественно технологии САД, показатели 2023 года в таблице 3 наглядно демонстрируют повышение общего уровня развития производственной области за счет использования технологий ТИМ (ВИМ).

Таблица 3. Расчеты показателей эффективности от внедрения технологии ТИМ (ВИМ) в производственной области
Table 3. Calculations of efficiency indicators from implementation of BIM technology in the production area

| № | Показатель | Обозначение | Значение | |
|---|---|-----------------------|-------------|----------------|
| | | | 2022 (САД) | 2023 ТИМ (ВИМ) |
| 1 | Объем товарной продукции предприятия, руб. | N _{ТОВ} | 30 | 30 |
| | Объем товарной продукции, которая трудно поддается реализации, руб. | N _{ОСТ} | 11 | 4 |
| | Коэффициент конкурентоспособности продукции предприятия | K_{кп} | 0,63 | 0,86 |
| 2 | Продукция, произведенная за выделенный период, куб; | Пп | 134 | 163 |
| | Среднесписочная численность сотрудников за этот же период, чел. | Сч | 6 | 6 |
| | Производительность труда | Птр | 22,3 | 27,1 |
| 3 | Время, затраченное на выпуск продукции | В | 192 | 192 |
| | Объем произведенного продукта | Оп | 134 | 163 |
| | Трудоемкость | Т | 1,4 | 1,17 |
| 4 | Объем произведенного продукта | Пп | 134 | 163 |
| | Число человеко-часов, для которых рассчитывается выработка | Чч | 192 | 192 |
| | Среднечасовая выработка | Всч | 0,69 | 0,85 |
| 5 | Количество вновь введенных технологических процессов, ед. | Пнт | 2 | 17 |
| | Общее количество технологических процессов, ед. | Побщ.т | 34 | 37 |
| | Коэффициент обновления технологий | Кобн.вим | 0,06 | 0,45 |

Прогнозируемый расчет показателей эффективности от внедрения технологий информационного моделирования в экономической области с 2023 по 2027 год является, также, положительным. Сумма

чистого приведенного дохода при многократном осуществлении инвестиционных затрат (ЧДД) составляет 14037337,57 рублей. Внутренняя норма доходности (ВНД) равна 0,34383 (34,383 %), в то время как критерием принятия инвестиционного проекта является превышение показателя ВНД выбранной ставки дисконтирования $i = 16,56\%$. В данном случае инвестиционный проект может быть принят, так как $\text{ВНД} = 34,383\% > i = 16,56\%$. Период окупаемости инвестиций составляет 4,25 года и находится в заданных пределах горизонта прогнозирования – 5 лет. Индекс рентабельности инвестиций – равен $1,64 > 1$, что является подтверждением эффективности цифровизации.

Несмотря на общую эффективность внедренной методики, следует обратить внимание как на негативные, так и позитивные стороны. К негативным факторам можно отнести следующие аспекты:

1. Требуется множество затрат на временные, финансовые и трудовые ресурсы.
2. Период адаптации, освоения новых технологий точно не может быть определен.
3. Многие из представленных решений по цифровизации несут в себе общий характер в дальнейшей работе организации требуют уточнения, конкретно: методы оценок эффективности должны быть многократно апробированы и дополнены, также, уже сейчас есть потребность в разработке собственных плагинов для большей оптимизации работы.
4. На данный момент не все организации перешли на BIM, соответственно часть процессов придется осуществлять в САД проектировании для большего охвата заказов и поддержания профессиональной репутации. Это может стать тормозящим фактором для применения новых технологий.

Положительными аспектами являются:

1. Внедрение BIM, достижение BIM-целей и решение BIM-задач способствует общей эффективности предприятия на рынке.
2. Повысилась эффективность работы сотрудников за счет минимизации рутинных процессов.
3. Ускорились процессы согласования с клиентами.
4. Увеличилась лояльность партнеров и заказчиков.
5. Сократилось время на выполнение проектной, рабочей и исполнительной документации.
6. BIM помогает быстрее дорабатывать типовые проекты частного домостроения под индивидуальные пожелания заказчиков.
7. Положительные показатели расчета экономической эффективности внедрения BIM показывают, что BIM является успешной инвестицией.

Как мы видим, позитивные стороны внедрения технологий преобладают, в совокупности с общими положительными выводами и конкретными количественными показателями эффективности можно сделать вывод, что предприятие стало более устойчивым на рынке среди конкурентов на рынке строительства.

Однако, не стоит оставлять без внимания и негативные стороны, важно разработать мероприятия, позволяющие устранить разрыв положительных и отрицательных показателей, обратить внимание на стагнацию определенных показателей и предложить меры по повышению эффективности.

В данной научной работе выделим возможные мероприятия, которые способствуют улучшению показателей эффективности для предприятия ООО «БЛОКЭТАЛОН ГРУПП»:

1. Привлечение независимых экспертов в области ТИМ (BIM) для независимой оценки внедрения, указания на слабые и сильные стороны методики внедрения и оценки эффективности.
2. Создание дополнительных разработок, обеспечивающих большую оптимизацию рутинных действий в программных комплексах для проектирования (плагины и т.д.), собственные разработки плагинов.
3. Общее коллективное участие в научных конференциях для прироста научных знаний и последующих технических разработок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На данном этапе внедрение технологии информационного моделирования в производственную область многопрофильной строительной организации ООО «БЛОКЭТАЛОН ГРУПП» можно считать успешным и эффективным. Относительно 2022 года, в 2023 году увеличился на 36,5% коэффициент конкурентоспособности продукции предприятия, возросла на 21,5% производительность труда, снизилась на 16,4% трудоемкость, повысилось значение среднечасовой выработки на 23,2%, коэффициент обновления технологий увеличился в 7,5 раз за счет единовременного введения 17 новых технологических процессов.

Для оценки общей эффективности интегрированных в организацию технологий следует придерживаться комплексного подхода, представленная методика позволяет систематизировать

пятьдесят показателей по восьми областям эффективности. Управление нововведениями – это постоянный процесс, в котором важна регулярность оценки показателей эффективности ТИМ (BIM). Гибкость и последовательность решений для достижения стратегических целей организации и использования всего научно-технического и производственного потенциала должны основываться на конкретные текущие качественные и количественные показатели, которые в свою очередь систематизированы. Постоянное совершенствование и своевременное проведение мер позволит предприятию минимизировать внешние и внутренние риски для успешного функционирования и повышения конкурентоспособности среди строительных организаций.

Результаты реализации методики на практическом примере позволяют сделать вывод о том, в каких из областей эффективности внедрение технологий информационного моделирования в работу многопрофильной строительной организации имеют значительные преимущества и обладают высокой практической значимостью, а какие показатели на данный момент требуют мероприятий их улучшению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система показателей, комплексно характеризующих результаты деятельности, с представленными способами расчетов и анализа результатов позволила оценить эффективность внедрения технологий информационного моделирования в многопрофильной строительной организации. Относительно применения САД технологий в 2022 году, ТИМ (BIM) технологии улучшили показатели эффективности в функциональной, ресурсной, экологической, научно-технической, финансовой, социальной и производственной областях в общем на 23%. Прогнозируемый экономический расчет по основным показателям экономической эффективности с 2023 по 2027 год подтверждает целесообразность использования ТИМ (BIM), обеспечивает устойчивость организации на рынке и повышает конкурентоспособность.

Комплексный подход и регулярная оценка качественными и количественными способами позволит улучшать эффективность использования технологий информационного моделирования на всем инвестиционно-строительном цикле проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов И.А., Ковалев А.М. Критерии-индикаторы эффективности инновационной деятельности предприятий // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2014. №11(71). С. 47-58.
2. Пелюшкевич М. Л. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности: учебное пособие. - СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета управления и экономики. 2014. 254 с.
3. Медынский В.Г. Инновационный менеджмент: учеб. по специальности "Менеджмент орг." / В. Г. Медынский. - Москва: Инфра-М, 2005. 293 с.
4. Абакумов Р.Г., Грищенко Е. Н., Стрекозова Л. В. Теоретические аспекты анализа и оценки организационно-технологических рисков в строительстве // Инновационная наука. 2016. № 5-1(17). С. 10-13. EDN VWVVNB.
5. Шелайкина А.Н., Абакумов Р.Г. Развитие методологических основ управления рисками инвестиционно-строительных проектов // Инновационная наука. 2017. № 1-1. С. 120-122.
6. Козлов И. М. Оценка экономической эффективности внедрения информационного моделирования зданий // Архитектура и современные информационные технологии. 2010. № 1(10). С. 6. EDN KZTKWX.
7. Кисель Т. Н. Экономическая эффективность применения BIM-технологий в строительстве в различных странах // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник материалов международной научной конференции, Москва, 16–17 ноября 2016 / ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. С. 492-497. EDN XSNHKD.
8. Бачурина С. С., Голосова Т. С. Этапы эффективного внедрения BIM в проектной компании // Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры управления проектами и программами, Москва, 14-17 апреля 2016 / Под ред. В. И. Ресина. – Москва: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. 2016. С. 104-109. EDN YGQRVP.
9. Соловьева Е. В., Сельвиан М. А. Основные этапы внедрения технологии информационного моделирования (BIM) в строительных организациях // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2016. № 11. С. 110-119. EDN XHREDF.
10. Диханов Н., Абрахманова К. К. Эффективность внедрения BIM-проектирования // Наука и инновационные технологии. 2016. № 1(1). С. 27-30. EDN XCONAR.
11. Пириева С. Ю. Анализ возможности внедрения в строительство технологии информационного моделирования зданий программами вида "BIM" // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2016 года. Белгородский государственный технологический

университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. С. 931-934. EDN XEILUX.

12. Сорокин А.В. Повышение эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий: дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / Сорокин Андрей Владимирович; Ин-т экономики РАН. Москва, 2006. 186 с.

13. Гонин В. Н., Кашурников А. Н., Ханчук Н. Н. Методические подходы оценки эффективности инновационной деятельности в экономических системах // Вестник Бурятского государственного университета. 2014. № 2. С. 6-12. EDN RYBOQR.

14. Mehmet Ümit Meterelliyöz, Ozan Önder BIM-enabled learning for building systems and technology. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 2022. Vol. 27, Pp. 1-19, DOI: 10.36680/j.itcon.2022.001

15. Fang Z., Liu Y., Lu Q., Pitt M., Hanna S., Tian Z. BIM-integrated portfolio-based strategic asset data quality management // Automation in Construction. 2022. № 134-104070. Pp. 76-83.

16. Soust-Verdager B., Bernardino Galeana I., Llatas C., Montes M.V., Hoxha E., Passer A. How to conduct consistent environmental, economic, and social assessment during the building design process. A BIM-based Life Cycle Sustainability Assessment method // Journal of Building Engineering. 2022, № 45-103516. Pp. 18-23.

17. Parn E.A., Edwards D.J., Sing M.C.P. The building information modeling trajectory in facilities management: A review. Automation in Construction. 2017. № 75. Pp.45-55. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.12.003;

ОБ АВТОРАХ

Алёна Константиновна Княжищева – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: archproject.org@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Alena K. Knyazhishcheva – the Master degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: archproject.org@gmail.com