

4. Naaim, M. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models / M. Naaim, F. Naaim-Bouvet, H. Martinez // *Ann. Glaciol. Cambridge University Press.* – 1998. – Т. 26. – 191–196 с.
5. Kobayashi, D. Studies of Snow Transport In Low-Level Drifting Snow\* / *Contrib. from Inst. Low Temp. Sci.* – 1972.
6. Isyumov, N. An Approach to the Prediction of Snow Loads / *University of Western Ontario.* – 1971.
7. Anno, Y. Requirements for modeling of a snowdrift // *Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier.* – 1984. – Т. 8, вып. 3. – 241–252 с.
8. Irwin, P.A. Application of Snow Simulation Model Tests to Planning and Design / P.A. Irwin, C.J. Williams // *Proc. East. Snow Conf. 28, 40th Annu. Meet. 1983.* - 18–130 с.
9. Isyumov, N. Wind Tunnel Modeling of Snow Accumulations on Large Area Roofs / N. Isyumov, M. Mikitiuk // *Proc. Second Int. Conf. Snow Eng. - Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992.* - 181–193 с.
10. O'Rourke, M. Laboratory Studies of snow Drifts on Multilevel Roofs / M. O'Rourke, N. Weitman // *Proc. Second Int. Conf. snow Eng. - Santa Barbara CA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover NH, July, 1992.* - 195–206 с.
11. Huang, N. Simulation of snow drift and the effects of snow particles on wind / N. Huang, J. Zhang // *Model. Simul. Eng.* – 2008. – Т. 2008.
12. Peterka, J.A. On the relaxation of saltation length as a modeling criteria for particulate transport by wind / J.A. Peterka, R.L. Petersen // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* – 1990.
13. Toparlar, Y. A review on the CFD analysis of urban microclimate / Y. Toparlar [и др.] // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2017. – Т. 80. – 1613–1640 с.
14. Blocken, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier.* – 2014. – Т. 129. – 69–102 с.
15. Murakami, S. Computational wind engineering // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Elsevier.* – 1990. – Т. 36. – 517–538 с.
16. Uematsu, T. Three-dimensional numerical simulation of snowdrift / T. Uematsu [и др.] // *Cold Reg. Sci. Technol. Elsevier.* – 1991. – Т. 20, вып. 1. – 65–73 с.
17. Liston, G.E. A two-dimensional computational model of turbulent atmospheric surface flows with drifting snow / G.E. Liston, R.L. Brown, J.D. Dent // *Ann. Glaciol.* – 1993. – Т. 18. – 281–286 с.
18. Bang, B. Computer simulation of wind speed, wind pressure and snow accumulation around buildings (SNOW-SIM) / Bang B. [и др.] // *Energy Build. Elsevier.* – 1994. – Т. 21, вып. 3. – 235–243 с.
19. SERINE, A. The Numerical Simulation of Snowdrift Around a Building / A. SERINE [и др.] // *Int. J. Comput. Fluid Dyn.* – 2007. – Т. 12, вып. 3–4. – 249–255 с.
20. Pomeroy, J.W. A process- based model of snow drift ing // *Ann. Glaciol.* – 1989. – Т. 13. - 237–240 с.

УДК 624.012.36

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНЬКОВОЙ ЗОНЫ БАЛОК КРИВОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ

Матвеев Н. В., Малиновский В. Н.

Отличительной особенностью при проектировании балок криволинейного очертания является конструирование коньковой зоны. При этом коньковой зоной считается зона балки, расположенной по обе стороны от нормального сечения, проходящего по коньку ломаной верхней грани. Согласно рекомендациям по расчету и конструированию двускатных балок [1] армирование коньковой

зоны должно быть таким, чтобы поперечная арматура могла воспринимать вертикальную составляющую от сил сжатия в верхних полках. В отечественной практике проектирования железобетонных конструкций (согласно [2]) при определении требуемого количества поперечной арматуры в коньковых узлах рам и балок выполняют расчет на отрыв, возникающий от действия вертикальной составляющей усилий в сжатом бетоне и (или) растянутой арматуре.

Формирующаяся вертикальная составляющая усилия в сжатой зоне бетона изменяет напряженно-деформированное состояние коньковой зоны пролета балки: траектория главных сжимающих усилий устремляется к нижней грани, а растягивающих – к верхней. Таким образом, в зоне конька балки создаются условия подобные фиктивной опоре, а в зоне между пролетным грузом и фиктивной опорой складывается двухосное напряженное состояние подобно напряженно-деформированному состоянию опорной зоны однопролетной балки постоянного сечения. Таким образом, напряженное состояние коньковой зоны оказывается куда более сложным, чем предложенная в [2] методика расчета, учитывающая только возможный отрыв сжатой зоны бетона.

С целью получения обоснованных данных о характере напряженно-деформированного состояния коньковой зоны и определения местоположения опасного сечения балок криволинейного очертания выполнено численное исследование напряженно-деформированного состояния предварительно напряженной железобетонной балки ломаного очертания (рисунок 1). Ширина сечения балки составляет 120 мм. Высота сечения переменная: минимальная 270 мм для наклонной части, максимальная 350 мм в коньке. Средняя прочность бетона при сжатии принята 37,50 МПа, при растяжении – 3,36 МПа. В качестве продольного армирования принят один прямолинейный канат диаметром 12,5 мм класса Y1860 S7. Уровень предварительного напряжения составляет  $0.7 \cdot f_{p0,1k}$ .

В наклонной части балки для обеспечения достаточного сопротивления балки изгибу предусмотрено продольное армирование из двух стержней диаметром 18 мм арматуры класса S500, в средней части – один стержень диаметром 18 мм класса S500. В сжатой зоне по всей длине установлено два стержня диаметром 12 мм класса S500. Поперечная арматура в балке не предусматривалась. Загружение балки осуществляется двумя сосредоточенными силами в месте излома нижней грани.

Более подробная информация о конструктивном решении и схеме загрузки балки представлена на рисунке 1.

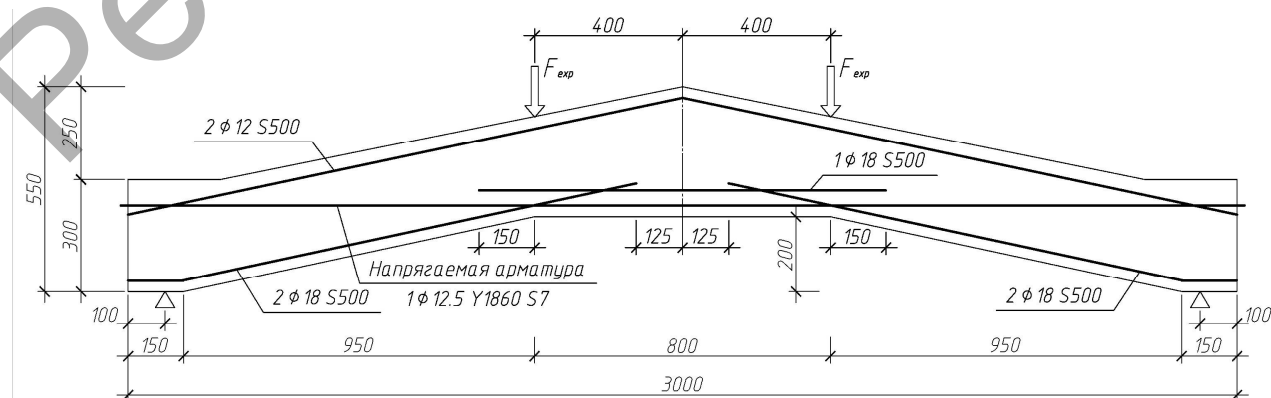


Рисунок 1 – Конструктивное решение и схема загрузки исследуемой балки

При моделировании искусственного каменного материала (бетона) при расчете на ЭВМ использовалась пластическая модель с вероятностью разрушения («concrete damage plasticity model»). Преимуществом данной модели является возможность учитывать образование и развитие трещин в условиях плоского напряженного состояния.

В основу расчетной диаграммы деформирования бетона при сжатии была принята согласно рекомендациям п. 6.1.5 СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции» полная диаграмма деформирования. Для описания в расчетах диаграммы деформирования бетона при осевом растяжении приняты аналитические зависимости L. Bertolotti [5], описывающие как восходящую, так и нисходящую ветвь.

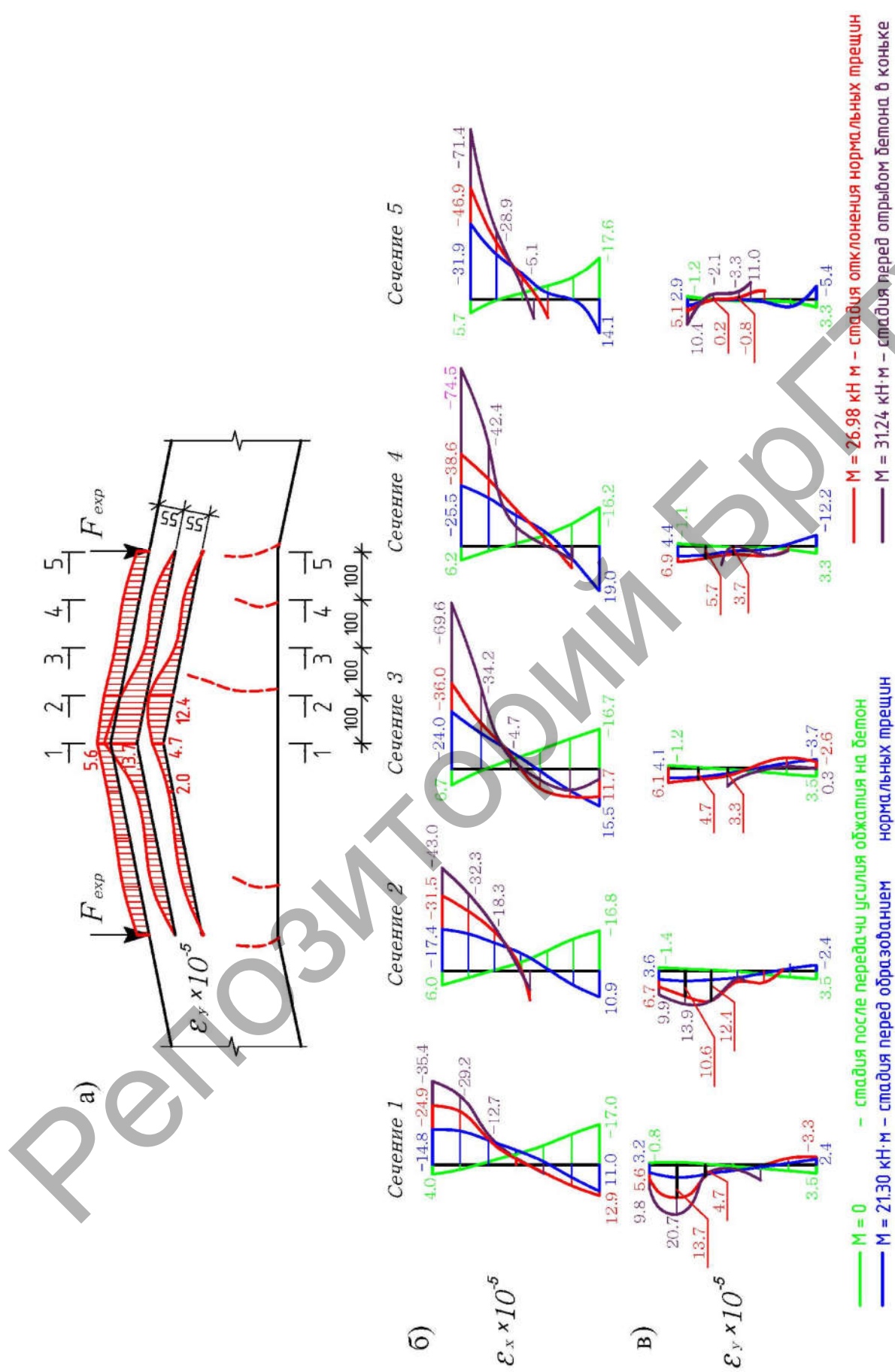
Для упрощения математической модели, уменьшения требуемой вычислительной мощности и продолжительности расчета модели полные диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении заменялись на кусочно-линейные, при этом количество линейных участков и характерные точки выбирались таким образом, чтобы расчетная диаграмма графически наиболее точно соответствовала полной диаграмме. Более подробная информация о принятых диаграммах деформирования и базовых параметрах для принятой модели сопротивления бетона (модуль упругости, коэффициент Пуассона, угол дилатации и др.) изложена в более ранних публикациях авторов [4, 5].

Для моделирования стальной арматуры была использована упрощенная диаграмма деформирования с двумя линейными участками - зоной упругой работы до характеристического значения предела текучести (условного предела текучести) и зоной пластической работы с незначительным упрочнением после достижения предела текучести.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее по следующим параметрам: усилие трещинообразования, зависимость «изгибающий момент – прогиб», разрушающая нагрузка [6].

На рисунке 2 приведены эпюры продольных ( $\epsilon_x$ ) и поперечных ( $\epsilon_y$ ) деформаций в пяти сечениях балки Б-1-1. Для оценки напряженно-деформированного состояния коньковой зоны балки анализ развития деформаций в сечениях выполнен на четырех характерных стадиях загрузки: после окончания передачи усилия обжатия бетона (изгибающий момент от внешней нагрузки  $M = 0$ ), перед образованием нормальных трещин в зоне чистого изгиба ( $M = 21.30 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ), при моменте  $M = 26.98 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , при котором начинается отклонение нормальных трещин в коньковой части балки в направлении пролетного груза и непосредственно перед отрывом бетона сжатой зоны в коньке ( $M = 31.24 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ).

На этапе обжатия отмечено линейное распределение деформаций во всех сечениях по длине коньковой зоны (рисунок 2, б, в). При этом в нижней части сечения продольные деформации имеют отрицательное значение, а в верхней положительное (что свидетельствует о сжатии и растяжении), соответствующие механике твердого тела при загрузении балки продольной сжимающей силой: по длине коньковой зоны балки относительные продольные деформации растяжения и сжатия имеют примерно одинаковую величину в зоне расположения сечений несмотря на изменение высоты сечения балки. Поперечные деформации в сечениях балки имеют малую величину, и их значения удовлетворительно связаны с величиной продольных деформаций коэффициентом Пуассона.



а) фрагмент коньковой зоны балки; б) эпюры продольных деформаций  $\epsilon_x$ ; в) эпюры вертикальных деформаций  $\epsilon_y$   
 Рисунок 2 — Напряженно-деформированное состояние коньковой зоны балки

До образования нормальных трещин в коньковой зоне балки ( $M = 21.30 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ) не отмечено каких-либо существенных различий в характере напряженно-деформированного состояния по сравнению с балками прямолинейного очертания: распределение как продольных, так и поперечных деформаций носит линейный характер, при этом в верхней части сечения возникают продольные деформации укорочения, в нижней – удлинения, что является признаком погашения усилия предварительного обжатия. Вертикальные деформации не меняют значительно величину и не оказывают существенного влияния на напряженно-деформированное состояние в сечениях коньковой зоны балки, но в большей мере увеличиваются по величине в сечениях, расположенных непосредственно у пролётных грузов.

За критерий образования трещин принято достижение относительными деформациями удлинения величины  $20.7 \cdot 10^{-5}$ , что соответствует пиковой точке диаграммы деформирования бетона при осевом растяжении, полученной по зависимостям, предложенным L. Vortolotti [3]. Величина продольных деформаций удлинения в сечении 4 на данном этапе загрузки, приближаясь к указанной величине, что свидетельствует о скором наступлении момента возникновения трещины.

Существенные изменения в направлении и величинах главных деформаций удлинения и укорочения отмечаются после образования с растянутой грани нормальных трещин в сечении, проходящем по коньку или в непосредственной близости от него (на расстоянии 100-150 мм). После возникновения трещин происходит резкое уменьшение высоты сжатой зоны бетона, сжимающие усилия в бетоне, направленные параллельно верхней грани балки, в данных сечениях концентрируются на относительно небольшой по высоте зоне сечения и, как следствие, значительно быстрее изменяются по величине по сравнению с усилиями без вертикальных трещин. Проекция этих усилий, направленная вертикально вверх, стремится оторвать конек балки и одновременно приводит к отклонению главных деформаций удлинения по направлению к коньку, а на уровне сжатой зоны бетона они ориентированы вертикально вверх, что позволяет сделать вывод о необходимости анализировать распределение в сечении вертикальных деформаций, как оказывающих наиболее существенное влияние на напряженное состояние коньковой зоны балки.

Эпюра вертикальных деформаций на данном этапе загрузки ( $M = 26.98 \text{ кН}\cdot\text{м}$ ) имеет ярко выраженный нелинейный характер: происходит резкое возрастание вертикальных деформаций по высоте сжатой зоны бетона, в то время как в растянутой части сечения их значения не изменяются по сравнению с предыдущими стадиями загрузки. Максимальные значения вертикальных деформаций отмечены на уровне центра тяжести сжатой зоны бетона, и это подтверждается ранее выполненными исследованиями [7].

Таким образом, в нормальных сечениях коньковой зоны действуют нормальные и касательные напряжения, то есть образуется плоское напряженное состояние, результатом которого являются главные растягивающие напряжения и образующиеся наклонные трещины, ориентированные под некоторым углом к продольной оси балки. Данное обстоятельство изменяет направление ранее образовавшихся нормальных трещин в сторону пролётных грузов, образуя наклонные трещины в средней части высоты сечения.

При величине изгибающего момента  $M = 31.24$  кН·м происходит образование горизонтальной трещины на расстоянии 40 мм от верхней грани балки, что приводит к отрыву сжатой зоны бетона на уровне центра тяжести сжатой арматуры (отслаивание защитного слоя бетона).

Анализ распределения вертикальных деформаций по длине балки (рисунок 2, а) показывает, что влияние вертикальной проекции усилия в сжатой зоне бетона имеет наибольшую интенсивность на участке длиной 200 мм от конька в каждую сторону, что примерно составляет величину высоты сжатой зоны бетона в сечении с трещиной (рисунок 2, б).

На основании выполненного исследования влияния ломаного очертания можно сделать следующие выводы:

1. До образования нормальных трещин в коньковой зоне напряженно-деформированное состояние балки ломаного очертания не имеет существенных отличий по сравнению с элементами прямолинейного очертания.

2. После образования нормальных трещин в сечении, проходящем по коньку или в непосредственной близости от него, сжимающие напряжения в бетоне, направленные параллельно верхней грани, концентрируются по относительно небольшой высоте сжатой зоны бетона и, как следствие, значительно увеличиваются, что приводит к резкому возрастанию вертикального усилия в коньке, вызывающему отрыв бетона сжатой зоны.

3. От действия вертикальной составляющей усилия в сжатой зоне бетона создаются условия подобные фиктивной опоре: в зоне между грузом и фиктивной опорой складывается двухосное напряженное состояние и нормальные трещины, образовавшиеся на начальных этапах загрузки, отклоняются по направлению к пролетному грузу.

4. Максимальные значения вертикальных растягивающих деформаций возникают на уровне центра тяжести сжатой зоны бетона на участке длиной  $(0,57 \cdot h)$  в каждую сторону от конькового сечения балки.

#### Список цитированных источников

1. Панарин, Н.Я. Железобетонные конструкции / Н.Я. Панарин, А.П. Павлов, Н.М. Онуфриев. – М.: Высшая школа, 1971. – 554 с.

2. Руководство по конструированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения) – М. : Госстройиздат, – 1978. – 129 с.

3. Bortolotti, L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension // ACI Materials Journal, Jan.-Feb. – 1991. – Vol. 88, № 1. – P. 70-73.

4. Малиновский, В.Н. Эффективность железобетонных конструкций при смешанном армировании // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник научных трудов. – Минск: Институт БелНИИС, 2016. – Вып.8. – С. 134–154. doi: 10.23746/2016-8-9.

5. Кривицкий, П.В. Математическая модель предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутой арматурой при различных пролетах среза / П.В. Кривицкий, Н.В. Матвеев // Вестник БрГТУ. Брест, 2018. № 1(109): Строительство и архитектура. – С. 92–97.

6. Малиновский, В.Н. Особенности напряженно-деформированного состояния балок с изменяющейся высотой сечения / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеев // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2018. – № 16 : Серия Ф. Строительство и прикладные науки.

7. Матвеев, Н.В. К исследованию напряженно-деформированного состояния коньковой зоны балок криволинейного очертания / Н.В. Матвеев, В.Н. Малиновский // Вестник науки и образования Северо-Запада России. –2018. – Т. 4, № 5. – С. 9 – 17.