

8. Nemirovsky A.M. Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete elements, taking into account the work of tensile concrete over cracks and revision on this basis of the theory of calculating deformations and crack opening // Strength and rigidity of reinforced concrete structures: Sat. Proceedings / Ed. A.A. Gvozdev. - M.: Stroyizdat, 1968. - S. 152-173.

УДК 624.012.36

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТОЙ СЕЧЕНИЯ

*Н.В.Матвеенко<sup>1</sup>, В.Н.Малиновский<sup>2</sup>, Е.С.Матвеенко<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup> м.т.н., старший научный сотрудник отраслевой лаборатории  
«Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве»*

*УО «Брестский государственный технический университет»,  
Брест, Беларусь, e-mail : nikifarych@yandex.ru*

*<sup>2</sup> к. т. н., доцент, профессор кафедры строительных конструкций  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,*

*<sup>3</sup> м.т.н., преподаватель кафедры строительных конструкций  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь*

### Реферат

В элементах криволинейного очертания в местах перелома граней возникают локальные поля напряжений, которые при определенных условиях могут привести к образованию наклонных трещин и разрушению элемента по одной из таких трещин. Несмотря на то, что в современной практике строительства применяется большое количество балок ломаного очертания, методики для учета локальных полей напряжения не существует, а поперечная арматура устанавливается на основании конструктивных требований и опыта применения подобных конструкций.

**Ключевые слова:** переменная высота сечения, изополя напряжений, железобетонная балка, трещиностойкость, касательные напряжения.

## FEATURES OF CALCULATION AND DESIGN OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH VARIABLE SECTION HEIGHT

*N.V.Matweenko, V.N.Malinovskiy, E.S.Matweenko*

### Abstract

In the curved elements, in the places of fracture of the faces, local stress fields arise, which, under certain conditions, can lead to the formation of shear cracks and the destruction of the element along one of these cracks. Despite the fact that a large number of corved beams are used in modern construction practice, there is no methodology for taking into account local stress fields, and transverse reinforcement is installed on the basis of design requirements and experience in the use of such structures.

**Keywords:** variable section height, stress isofields, reinforced concrete beam, crack resistance, shear stresses.

### Введение

Начиная с 30 гг. XX в. в практике отечественного и зарубежного строительстве нашли применение железобетонные конструкции криволинейного очертания [1]. Область применения элементов подобного типа обусловлена особенностями их конструктивного решения. Как правило, у элементов ломаного очертания верхняя и нижняя грани не параллельны друг другу и могут быть расположены под углом к горизонту (рисунок 1). При этом они могут иметь от одного до нескольких переломов по длине, что позволяет эффективно использовать подобные элементы в качестве стропильных конструкций (двускатные и односкатные балки покрытия, ригели монолитных рам), а также балок пролетного строения мостовых сооружений.

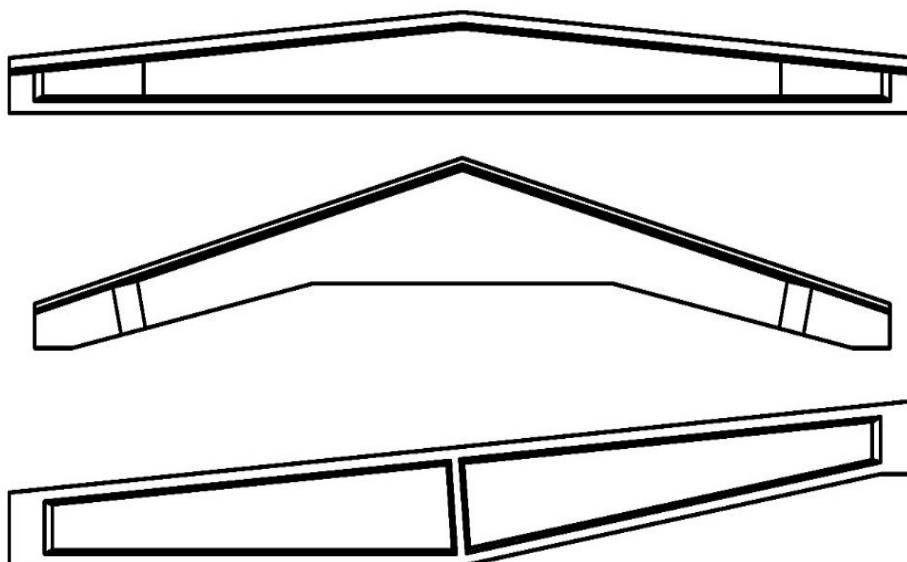


Рисунок 1 – Элементы ломаного очертания

Первоначально балки ломаного очертания применялись без предварительного напряжения [2], но уже к середине XX в. стало очевидным, что применение в подобных элементах напрягаемой арматуры повышает эффективность использования арматуры и технико-экономические показатели конструкции в целом. Наряду с таким очевидным преимуществом балок ломаного очертания как увеличение высоты сечения в местах действия максимального изгибающего момента  $F$ . *Leonhardt* [3] отметил, что в балках криволинейного очертания прямая напрягаемая арматура повторяет траекторию главных растягивающих напряжений. Особенно ярко данный эффект проявляется в многопролетных неразрезных балках. Благодаря этому становится возможным использовать предварительно напряженную арматуру для повышения трещиностойкости не только нормальных, но и наклонных сечений, а также для увеличения сопротивления срезу.

Несмотря на ряд преимуществ элементов ломаного очертания в современной практике строительства данные конструкции применяются редко. Это связано с определенными сложностями, возникающими при их проектировании.

Большинство исследователей среди особенностей расчета и конструирования элементов ломаного очертания выделяют два наиболее важных аспекта. Во-первых, в конструкциях подобного типа, имеющих переменную высоту сечения, происходит формирование вертикальной составляющей усилия в сжатой зоне бетона, которая может увеличивать или снижать поперечное усилие, вызванное действием внешних сил. Во-вторых, в местах излома граней конструктивных элементов возникают поля локальных напряжений, которые в значительной степени влияют на напряженно-деформированное состояние конструкции в целом.

**Касательные напряжения в элементах с переменной высотой сечения**

В элементах с переменной высотой сечения величина касательных напряжений зависит не только от поперечной силы, но и от изгибающего момента и продольной силы. Результирующие касательные напряжения могут быть определены по формуле [4]:

$$\tau_{xy} = \tau_V + \tau_M + \tau_N, \quad (1)$$

где  $\tau_M$ ,  $\tau_V$ ,  $\tau_N$  – касательные напряжения, возникающие от действия соответственно изгибающего момента, поперечной и продольной силы.

Для железобетонного элемента с наклонной верхней гранью и горизонтальной нижней компоненты касательных напряжений могут быть определены по формулам:

$$\tau_V = \frac{V \cdot S_{c.red}}{I_{c.red} \cdot b}, \quad (2)$$

$$\tau_M = \frac{M}{W_{c.red}} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \left( 3 \cdot \frac{y_1^2}{h^2} + \frac{y_1}{h} - \frac{1}{4} \right), \quad (3)$$

$$\tau_N = \frac{N}{A_{c.red}} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \left( \frac{y_1}{h} + \frac{1}{2} \right), \quad (4)$$

где  $y_1$  – координата точки сечения относительно нейтральной оси;

$W_{c.red}$  – момент сопротивления приведенного сечения;

$\alpha$  – угол между верхней и нижней гранью элемента.

Анализируя выражения (3) и (4) можно констатировать, что на результирующие касательные напряжения значительное влияние оказывает величина усилий, действующих в рассматриваемом сечении и угол наклона верхней грани балки (положительный – если она образована поворотом горизонтальной поверхности против часовой стрелки и отрицательным – если по часовой) [4].

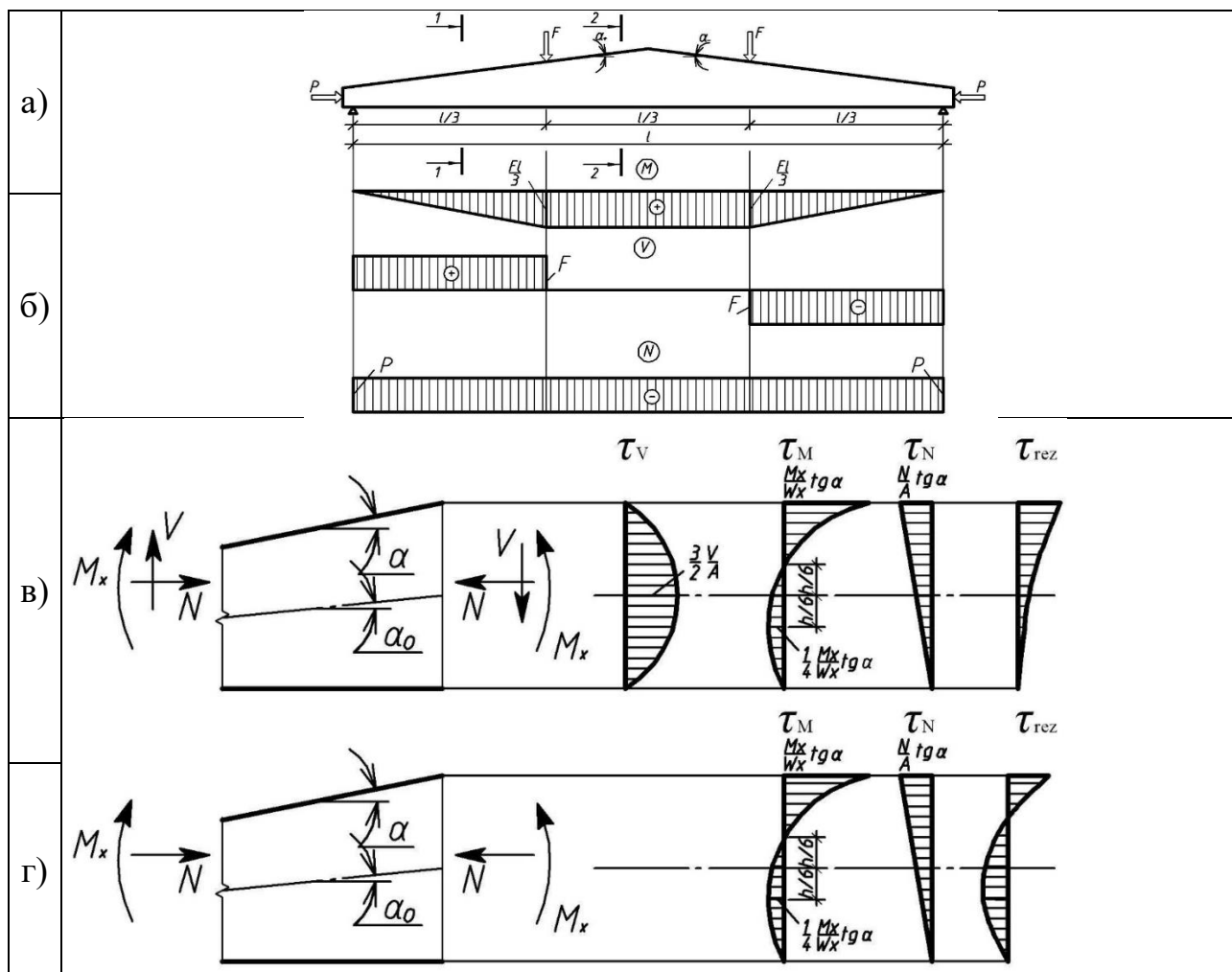
В зависимости от конструктивного решения балки, степени наклона граней и её схемы нагружения касательные напряжения от различных видов усилий могут суммироваться, что приводит к увеличению касательных напряжений в балках с переменной высотой сечения в сравнении с балками с параллельными поясами, либо взаимно компенсироваться, что приводит к снижению напряжений.

Проявление данного эффекта подтверждается рассмотрением двускатной балки, нагруженной двумя сосредоточенными силами (рисунок 2). В представленной балке угол наклона верхней грани слева от конька положительный, а справа – отрицательный.

Принимая во внимание данное обстоятельство, а также учитывая знаки эпюр усилий, возникающих в однопролетной двускатной балке, загруженной двумя вертикальными силами и продольной сжимающей силой (рисунок 2) получены эпюры касательных напряжений в сечении у опоры (рисунок 2, в) и в сечении, расположенном между пролетными грузами в середине пролета (рисунок 2, г).

В приопорной зоне балки одновременно действуют изгибающий момент, продольная и поперечная силы. В данном случае результирующие касательные напряжения по высоте сечения меньше по величине за счет благоприятного эффекта от действия на этом участке балки изгибающего момента и продольной силы.

В середине пролета, на участке между приложенными силами поперечное усилие отсутствует. Принято считать, что касательные напряжения в этой зоне отсутствуют, но в связи с тем, что рассматриваемая балка имеет переменную высоту сечения, в зоне чистого изгиба возникают сдвигающие напряжения от действия изгибающего момента ( $\tau_M$ ) и продольной силы ( $\tau_N$ ). Очевидно, что при определенном сочетании конструктивных и силовых факторов результирующее напряжение может привести к образованию наклонных трещин в зоне чистого изгиба.



а) – расчетная схема балки; б) – эпюры внутренних усилий; в) – эпюры касательных напряжений в сечении 1-1; г) – эпюры касательных напряжений в сечении 2-2  
Рисунок 2 – Касательные напряжения в двускатной балке

### Особенности конструирования балок с переменной высотой сечения в зонах вблизи перелома граней.

К отмечалось выше, в местах перелома граней балки возникают локальные поля напряжений, которые при недостаточном поперечном армировании могут привести к разрыву бетона по горизонтальному сечению (рисунок 3).

Перелом сжатой грани балочных элементов, как правило, располагается в середине пролета и представляет собой конек двускатной балки или рамы. В соответствии со статической схемой работы элементов подобного типа в средней части пролета поперечное усилие отсутствует либо имеет незначительную величину. В связи с этим, поперечная арматура в середине пролета устанавливается согласно конструктивным требованиям (п. 11.2.21 [5]: шаг вертикальных стержней не должен превышать  $3/4 \cdot h$ , но не более 500 мм.

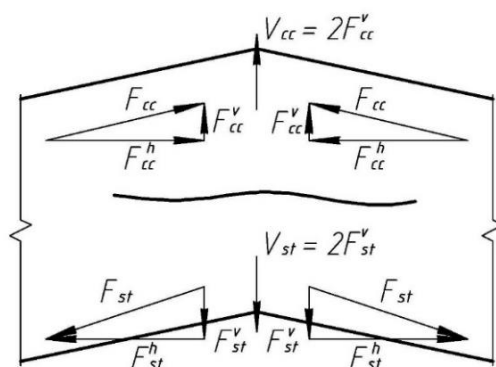


Рисунок 3 – Схема действия усилий и образования трещин в коньковых зонах балок и рам

Для двускатных железобетонных балок с полкой в сжатой зоне необходимо предусматривать поперечное армирование, которое воспринимало бы вертикальную составляющую от сил сжатия в верхних полках [6]. При наличии в коньке вертикального ребра эта сила может быть воспринята вертикальными стержнями, армирующими ребро. При отсутствии ребра необходимо предусмотреть в каркасе стенки дополнительные стержни, расположенные на участке длиной не более  $1/3$  высоты сечения балки в коньке с обязательной приваркой вверху и внизу к продольным стержням сварных каркасов (рисунок 4).

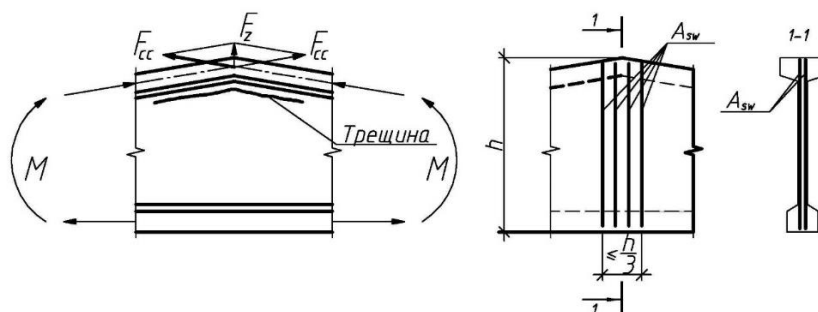


Рисунок 4 – Схема образования трещин отрыва и армирование конька двускатной балки

При анализе конструктивных решений типовых серий двускатных железобетонных балок сплошного сечения [7-11] установлено, что при уклоне верхней грани

1:12 и пролетах 18 м и более поперечная арматура в середине пролета устанавливается чаще, чем это необходимо по конструктивным требованиям [7], а в ряде случаев длина зоны, на которой устанавливаются дополнительные вертикальные стержни превышает рекомендуемую величину –  $h/3$  [11].

### **Заключение**

На основании анализа факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние элементов ломанного очертания, а также на основании изученных конструктивных решений типовых железобетонных стропильных балок можно сделать следующие выводы:

– в элементах с переменной высотой сечения касательные напряжения возникают не только от действия поперечной силы, но и от изгибающего момента и продольного усилия, которые могут приводить к увеличению касательных напряжений, вызванных перерезывающим усилием или возникновению сдвигающих напряжений в зоне чистого изгиба;

– вблизи точек перелома верхней грани балки происходит концентрация данных напряжений, что приводит к формированию усилия, действующего по биссектрисе угла сопряжения и выступающего в роли фиктивной опоры;

– в зоне между пролетным грузом и фиктивной опорой складывается двухосное напряженное состояние подобно напряженно-деформированному состоянию опорной зоны однопролетной балки постоянного сечения;

– в условиях плоского напряженного состояния образуются концентрированные полосы, зоны или поля напряжений, связанные с точками приложения действующих на элементы внешних и равнодействующих внутренних усилий. При определенных условиях данное обстоятельство может привести к появлению диагональных трещин и последующему разрушению по наклонным сечениям в средней части пролета вблизи конька балки;

– для предотвращения разрушения по данной схеме в типовых железобетонных балках у конька поперечная арматура устанавливается чаще, чем это требуется в однопролетных балках согласно действующим нормам, или дополнительные стержни предусматриваются на длине большей, чем это необходимо для предотвращения отрыва сжатой полки от стенки в элементах тавровой и двутавровой формы сечения;

– на данный момент не существует методики учета всех компонентов напряжений, возникающих в местах перелома верхней и нижней грани балки, а дополнительная поперечная арматура в типовых балках, вероятнее всего, устанавливается конструктивно на основании результатов натурных испытаний и ее количество не обосновано соответствующим расчетом;

– установление расчетных зависимостей для описания распределения продольных, поперечных и касательных напряжений в зонах вблизи перелома верхней и нижней грани балки позволит уточнить требуемое количество поперечного армирования, что приведет к более рациональному использованию арматурной стали и повышению надежности конструкции.

### **Список цитированных источников**

1. Малиновский, В. Н. Опыт применения предварительно напряженных железобетонных балок ломанного очертания / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеевко //

Сб. научных статей XXI Международного научно-методического семинара; Брест, 25-26 октября 2018 года / БрГТУ; редкол.: В.В. Тур [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 188 – 193.

2. Colonnetti, G., 1939. Trave armata ad armature preventivamente tesa, Italian Patent n. 50911.

3. Leonhardt, F Continuous Prestressed Concrete Beams / F. Leonhardt // Journ. of ACI. – Mar., 1953. – Vol. 22, № 7. – P. 617–634.

4. Александров, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин \ под ред. А.В. Александрова. – М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.

5. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во архит. и строит. РБ, 2020. – 244 с.

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

7. Железобетонные сборные несущие конструкции для покрытий с рулонной кровлей. Балки напряженно-армированные цельные стендового изготовления для пролетов 9, 12, 15, 18 м со стержневой арматурой : серия ПК-01-06. Выпуск 1. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1957. – 67 с.

8. Железобетонные двутавровые балки пролетом 18 м для малоуклонных покрытий промышленных зданий : серия 1.462.1-16. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1984. – 22 с.

9. Балки стропильные железобетонные двутавровые пролетом 15 м для покрытий одноэтажных промышленных предприятий : серия 1.462.1-23. – М.: ЦНИИПРОМЗДАНИЙ, 1992. – 41 с.

10. Балки стропильные железобетонные двутавровые пролетом 21 м для покрытий одноэтажных промышленных предприятий : серия 1.462.1-24. – М.: ЦНИИПРОМЗДАНИЙ, 1992. – 32 с.

11. Балки двускатные типа «Бумеранг» для покрытий сельскохозяйственных производственных зданий. Рабочие чертежи. Опытная партия : серия Б1.862.1-ДБ. Выпуск 3. – Минск : Институт БелНИИС, 2013. – 23 с.

## References

1. Malinovskij, V. N. Opy`t primeneniya predvaritel`no napryazhenny`kh zhelezobetonny`kh balok lomannogo ochertaniya / V.N. Malinovskij, N.V. Matveenko // Sb. nauchny`kh sta-tej XXI Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminara; Brest, 25-26 oktyabrya 2018 goda / BrGTU; redkol.: V.V. Tur [i dr.]. – Brest: BrGTU, 2018. – Ch. 1. – S. 188 – 193.

2. Colonnetti, G., 1939. Trave armata ad armature preventivamente tesa, Italian Patent n. 50911.

3. Leonhardt, F Continuous Prestressed Concrete Beams / F. Leonhardt // Journ. of ACI. – Mar., 1953. – Vol. 22, № 7. – P. 617–634.

4. Aleksandrov, A.V. Soprotivlenie materialov / A.V. Aleksandrov, V.D. Potapov, B.P. Derzhavin \ pod red. A.V. Aleksandrova. – M.: Vy`sshaya shkola, 2003. – 560 s.

5. Betonny`e i zhelezobetonny`e konstrukczii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 16.11.2020. – Minsk : M-vo arkh. i stroit. RB, 2020. – 244 s.

6. Panarin, N. Ya. Zhelezobetonny`e konstrukczii / N. Ya. Panarin, A. P. Pavlov, N. M. Onufriev. – M.: Vy`sshaya shkola, 1971. – 554 s.

7. Zhelezobetonny`e sborny`e nesushhie konstrukczii dlya pokry`tij s rulonnoj krovlej. Balki napryazhenno-armirovanny`e czel`ny`e stendovogo izgotovleniya dlya proletov 9, 12, 15, 18 m so sterzhnevoj armaturoj : seriya PK-01-06. Vy`pusk 1. – M.: CzITP Gosstroya USSR, 1957. – 67 s.

8. Zhelezobetonny`e dvutavrovyy`e balki proletom 18 m dlya malouklonny`kh pokry`tij pro-my`shlenny`kh zdaniy : seriya 1.462.1-16. – M. : CzITP Gosstroya USSR, 1984. – 22 s.

9. Balki stropil`ny`e zhelezobetonny`e dvutavrovyy`e proletom 15 m dlya pokry`tij odno-e`tazhny`kh promy`shlenny`kh predpriyatij : seriya 1.462.1-23. – M. : CzNIIPROMZDA-NIJ, 1992. – 41 s.

10. Balki stropil`ny`e zhelezobetonny`e dvutavrovyy`e proletom 21 m dlya pokry`tij odno-e`tazhny`kh promy`shlenny`kh predpriyatij : seriya 1.462.1-24. – M. : CzNIIPROMZDA-NIJ, 1992. – 32 s.

11. Balki dvuskatny`e tipa «Bumerang» dlya pokry`tij sel`skokhozyajstvenny`kh proizvod-stvenny`kh zdaniy. Rabochie chertezhi. Opy`tnaya partiya : seriya B1.862.1-DB. Vy`pusk 3. – Minsk : Institut BelNIIS, 2013. – 23 s.

УДК 624.046.5

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В РАСЧЁТАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ**

***В.В. Молош<sup>1</sup>, А.Е. Желткович<sup>2</sup>, К. Пархоц<sup>3</sup>, Н.Г. Совеико<sup>4</sup>, И.Г. Томашев<sup>5</sup>***

<sup>1</sup>*К.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: m.vic@rambler.ru*

<sup>2</sup>*К.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gelpek@mail.ru*

<sup>3</sup>*Инженер программист, Беларусь, e-mail: konstantinparhoc@gmail.com.*

<sup>4</sup>*Programmer engineer, Belarus, e-mail: nick-2009@live.ru.*

<sup>5</sup>*Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tomashev@mail.ru*

### **Реферат**

Сопротивление срезу при продавливании железобетонных плит перекрытий представляет собой один из наиболее сложных видов сопротивления железобетонных конструкций, так как имеет хрупкую форму разрушения с мгновенным отделением плиты от колонны, Точность оценивания сопротивление срезу при продавливании имеет в проектировании железобетонных конструкций ключевое значение. Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования сопротивления срезу при продавливании ведутся уже более ста лет, единой и достоверной расчётной модели к настоящему времени не разработано.