

13. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.И. Мурашев [и др.]; под ред. П.Л. Пастернака. – Москва: Гос. Изд-во лит-ры по стр-ву, арх-ре и стр. материалам, 1962. – 658с.
14. Немировский, Я.Н. Пересмотр некоторых положений теории раскрытия трещин / Я.Н. Немировский // Бетон и железобетон. – 1970. – №3. – С. 13–16.
15. Holmberg, A. Unbonded Portions Between Concrete Cracks / A. Holmberg // Danish Society for Farra, B. and Jaccoud, J-P. Bond behaviour, tension stiffening and crack prediction of high strength concrete / Proceedings of International Symposium «Bond in Concrete». – Riga, 1992. Structural Science and Engineering. – 1984. – Vol. 55, No.4. – P. 113–117.
16. Noakowski, P. Determination of crack width: Simple and close to reality method considering tensile strength of concrete and steel bonding / P. Noakowski // Technology of Concrete. Supplement. – Gdansk, 2004.
17. Alvarez, M. Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton. – Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998. – 189 s.

Материал поступил в редакцию 24.01.12

#### DRAHAN A.V., TUR V.V. Modeling of resistance of RC-elements at action of tensile load

In article is presented the general engineering design procedure of crack width, received on the basis of experimentally-theoretical research of work of reinforced concrete elements at action of tension loading. Being based on studying of the mechanism of interaction and transfer of forces between reinforcement and tension concrete to authors of article it was possible:

- to establish laws of formation and opening of cracks in reinforced concrete elements;
- to formulate an analytical model of resistance of a reinforced concrete element to action of the tension loading, based on the complex approach to process of cracking, considering physical laws of deformation and interaction of materials, and on her basis to receive the equations describing distributions of relative deformations of reinforcement and tension concrete on the length of an element. It has allowed to make quality assessment of the strain-stress state of the reinforcement and the tension concrete at different cracking stages;
- to receive an analytical equation for definition of the length of the force transfer zone between the reinforcement and the tension concrete for the various bonding conditions defined by surface and diameter of reinforcement, and also strength of concrete;
- to receive a relation connecting average crack width ( $w_m$ ) with relative deformations of reinforcement in section with a crack, geometrical parameters of cross-section section of a reinforced-concrete element, strength characteristics of reinforcement and concrete and in the predicted distance between cracks.

УДК 624.012

Тур В.В., Басов А.В.

### О НОРМИРОВАНИИ ВЕЛИЧИНЫ ВТЯГИВАНИЯ КАНАТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЛИТ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ

**Введение.** Как было показано в наших работах [1], пустотные плиты безопалубочного формования являются наиболее широко применяемыми конструктивными элементами при устройстве перекрытий зданий. Только в течение 2010 года в Республике Беларусь на десяти линиях по производству плит безопалубочного формования выпущено более 1,2 млн. м<sup>2</sup> изделий.

Вместе с тем на практике имеет место определенный круг проблем, связанных как с изготовлением, так и с применением пустотных плит безопалубочного формования.

Так, при изготовлении плит пустотного настила по технологии безопалубочного формования наблюдается втягивание напрягающих канатов при передаче усилия обжатия на бетон в процессе резки отформованной дорожки на отдельные конструктивные элементы заданной длины.

Естественно, что в подобной ситуации как у самих производителей, так и у контролеров, возникает закономерный вопрос: должно ли происходить втягивание канатов и, если да, то какова допустимая величина втягивания и как далее наблюдаемый эффект повлияет на поведение конструктивного элемента под нагрузкой?

В соответствии с п. 4.8.12 СТБ 1383 [21] для плит безопалубочного формования "...не допускается средняя величина продольного смещения торцов напрягаемой арматуры относительно бетона более 2 мм". В представленном виде запись не только не конкретна (например, что понимать под "средней величиной продольного смещения"?), но и само значение параметра требует обоснования применительно к плитам безопалубочного формования, армированным семипроволочными канатами.

Следует отметить, что обеспечение совместной работы напрягающей арматуры и окружающего бетона в изделиях, изготовленных в экструдерах и слипформерах, является довольно сложной и, не

смотря на широкое применение плит безопалубочного формования в мировой практике строительства, не изученной до конца проблемой. Качество изделий безопалубочного формования определяющим образом зависит от изменения параметров технологии безопалубочного формования, в частности требуемого сцепления напрягаемой арматуры с окружающим бетоном, которое достигается, главным образом, качественной укладкой и уплотнением бетона на первой стадии формования (например, при использовании двухстадийной технологии формования в слипформерах).

**1. Теоретические и нормативные подходы к определению длины зоны передачи напряжений.** В наших работах [1] достаточно подробно рассматривались вопросы, относящиеся к теоретическим основам оценки длины зоны передачи напряжений и связанной с ней величины втягивания канатов. Было показано, что в общем случае длины зоны передачи напряжения практически линейно зависят от величины втягивания каната на торце элемента и, в соответствии с [4] эта зависимость может быть выражена в следующем виде:

$$l_{pt} = \alpha_0 \frac{E_p}{\sigma_{pm,0}} \delta_e, \quad (1)$$

где  $l_{pt}$  – длина зоны передачи напряжений при отпуске каната с упоров;

$\alpha_0$  – коэффициент, зависящий от характера распределения напряжений в канате на длине зоны передачи напряжений (см. табл. 1);

$E_p$  – модуль упругости напрягаемой арматуры;

$\sigma_{pm,0}$  – напряжения в напрягаемой арматуре непосредственно перед передачей усилия обжатия на бетон;

Басов Артур Викторович, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

$\delta_e$  – величина втягивания каната.

Несложно заметить, что зависимость (1) представляет собой, по существу, известную формулу И. Гийона (Gyon), использованную в разное время с некоторыми модификациями при разработке СНиП II-V.1-62\*, СНиП II-21-75 и СНиП 2.03.01-84\* (см. табл. 1).

**Таблица 1.** Числовые значения коэффициента  $\alpha_0$  в ф. (1)

Источник	Напрягающий элемент	$\alpha_0$
Gyon, 1951 [4]	проволока гладкая	3,0
Bruggeling A. [17]	проволока	3,0
RILEM-FIB-CEB-RCP-14-1979 [20]	проволока	3,5
PCI Manual [19]	семипроволочный канат	2,0

Следует иметь в виду, что длина зоны передачи напряжений зависит от способа передачи усилия обжатия. Так, при резкой (мгновенной) передаче усилия обжатия длина зоны  $l_{pt}$  может возрастать даже на 60 % по сравнению с аналогичной величиной, получаемой при плавном отпуске каната. В СНБ 5.03.01 [1] этот эффект учитывается при вычислении базовой длины  $l_{pt}$  введением повышающего коэффициента  $\alpha_1$ , равного 1,25.

В соответствии с требованиями СНБ 5.03.01 [1] при расчете базовой длины передачи напряжений  $l_{pt}$  учитываются основные факторы, влияющие на условия обеспечения совместной работы напрягающего элемента и бетона (прочность бетона при растяжении к моменту передачи усилия обжатия, косвенные характеристики поверхности арматуры, ее диаметр, величина напряжений в арматуре к моменту передачи усилия обжатия):

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \sigma_{pm,0}}{\eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(f)} \cdot \varnothing, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий способ передачи усилия обжатия (при резкой передаче  $\alpha_1 = 1,25$ );

$\alpha_2$  – коэффициент, принимаемый для семипроволочных канатов равным 0,19;

$\varnothing$  – номинальный диаметр каната;

$\sigma_{pm,0}$  – напряжения в канате сразу после передачи усилия обжатия на бетон (с учетом всех первых технологических потерь);

$\eta_{p1}$  – коэффициент, учитывающий условия сцепления и принимаемый равным для канатов 3,2.

В табл. 2 приведены расчетные значения длины зоны передачи напряжений, определенные по нормам различных стран.

Как видно из результатов, представленных в табл. 2, длина зоны передачи напряжений  $l_{pt1}$ , рассчитанная по различным нормативным документам существенно различается, что, безусловно, влияет и на расчетное значение втягивания каната  $\delta_e$ . Выбор норм для сравнения не был случайным. Зависимости, включенные в СНБ 5.03.01 [5] и EN 1991-1-2 [10], выражают прочность сцепления через прочность бетона на растяжение  $f_{ctd}(f)$  к моменту передачи усилия обжатия, формулы ACI318 [7] и BS8110 [9] вообще не содержат характеристик свойств бетона, а учитывают их косвенно, требуя назначения передаточной прочности не менее 30 МПа. Стандарт ISO 1343 содержит требование, выражающее длину зоны передачи напряжений в количестве номинальных диаметров ( $\beta = l_{pt} / \varnothing$ ). Это требование, установленное нормами различных стран, приведено в табл. 3. Надо отметить, что в табл. 3 приведены некоторые граничные значения отношений, определенные для указанных уровней предварительно-

**Таблица 2.** Расчетные значения длины зоны передачи напряжений  $l_{pt1}$

№ п/п	Документ	Формула	Расчетная длина зоны передачи напряжений $l_{pt1}$ [мм] при диаметре каната $\varnothing_{nom}$ [мм]		
			9,0	12,0	15,0
1	СНБ 5.03.01 EN 1991-1-2	$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \varnothing \cdot \sigma_{pm,0} / f_{bpt}$ $f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}$ $l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt}$	445,3	593,6	742,2
2	ACI-318 BS8110	$l_{pt1} = \frac{\sigma_{pm,0}}{K} \varnothing$ $K = 21 (K = 38)$	482,14 (266,45*)	642,86 (355,63)	803,6 (445,0)
3	СП 52-102-2004	$l_{pt1} = \frac{\sigma_{pm,0}}{4 \cdot R_{bond}} \varnothing_{nom}$ но не менее 300 мм $R_{bond} = 2,2 \cdot f_{ctd}$	855,0	1140,0	1425,0
4	ISO:1332-1980	$30\varnothing$	270,0	360,0	450,0

*Примечание:* В скобках приведены значения при опытном значении  $K_0 = 38$  согласно [19],  $\sigma_{pm,0} = 1077$  МПа;  $f_{cm,0} = 40$  МПа;  $f_{bpt} = 4,32$  МПа

**Таблица 3.** Расчетные значения относительной длины зоны передачи напряжений  $\beta$  по нормам различных стран (для семипроволочных канатов)

Нормативный документ	Напряжения в арматуре в момент передачи усилия обжатия, МПа	Отношение длины зоны передачи напряжений $l_{pt}$ к номинальному диаметру каната ( $\beta = l_{pt} / \varnothing$ ) при средней передаточной прочности бетона $f_{cm,0}$ , МПа		
		30	40	50
ASO [8]	1450	183 / 11,2	135 / 8,4	нет данных
канат $\varnothing 12,5$ мм				
ACI-318R [7]	1400	66 / 3,5 *	66 / 3,5	66 / 3,5
BS 8110 [9]	$\leq 0,75 \cdot f_{pk}$	44 / 2,3	38 / 1,7	34 / 1,4
EN 1992-1 [10]	$\geq 1200$	70 / 3,5	60 / 2,7	нет данных
NEN 6720 [11]	1450	66 / 4,0	59 / 3,6	нет данных
PN 84/B [12]	1350	78 / 4,4	61 / 3,5	нет данных
СНиП 2.03.01 [22]	1000	63 / 3,6	53 / 2,9	-

го напряжения.

Несложно заметить, что расчетные значения длины зоны передачи напряжений, определяемые по нормам различных стран, существенно отличаются. Это связано, с одной стороны, с различными методическими подходами к определению длины  $l_{pt}$ , а с другой – со значительным разбросом опытных данных.

**2. Особенности определения длины зоны передачи напряжений в плитах безопалубочного формирования.** Как уже отмечалось ранее, расчетные зависимости, применяемые для определения длины анкеровки напрягающих элементов, включенные практически во все нормы, базируются на опытных данных, полученных при испытаниях конструкций из тяжелого бетона, изготовленных по технологиям виброуплотнения (при нормальных водоцементных отношениях). Плиты безопалубочного формирования выполняют из жестких бетонных смесей (жесткостью от 17 с до 20 с), что накладывает дополнительные эффекты на совместную работу напрягающих элементов с бетоном как на стадии обжатия, так и при эксплуатационных нагружениях. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев для оценки длины зоны передачи напряжений используют зависимости, полученные при исследованиях анкеровки.

Как было показано в работах *Anderson* [19] и подтверждено исследованиями *Brooks, Gerstle и Logan* [14, 20], мерой удовлетворительного сцепления является втягивание напрягающего элемента на свободном торце плиты после разрезки отформованной дорожки. Граничное значение втягивания на свободном торце предложено рассчитывать по формуле (в системе СИ):

$$\delta_{all} = \frac{\sigma_{pm,0(\infty)} \cdot \sigma_{p,max}}{41 \cdot E_p} \cdot \varnothing, \quad (3)$$

где  $\sigma_{pm,0(\infty)}$  – напряжения в канатах с учетом потерь;

$\sigma_{p,max}$  – начальные напряжения в канатах перед передачей усилия обжатия.

Это выражение дает укорочение каната на длине зоны передачи напряжений. Например, для каната с номинальным диаметром  $\varnothing_{ном} = 12,7$  мм, начальные напряжения в котором составляют  $\sigma_{p,max} = 1300$  МПа, втягивание на свободной грани не должно превышать 2,4 мм.

Если втягивание каната превышает  $\delta_{all}$ , то имеет место увеличение длины зоны передачи напряжений и длины анкеровки по сравнению с расчетными значениями.

В процессе контроля качества при производстве плит безопалубочного формирования предполагается измерение величины втягивания канатов. Если в процессе такого контроля установлено, что ве-

личина втягивания превышает допустимые значения  $\delta_{all}$ , необходимо выполнить перерасчет предельной нагрузки на плиту с учетом фактической длины зоны передачи напряжений и длины анкеровки. В соответствии с [19] для расчета длины зоны передачи напряжений и длины анкеровки могут быть применены расчетные формулы (для каждого из канатов):

$$l_{pt2} = \frac{2 \cdot \delta_{l(on)} \cdot E_p}{\sigma_{p,max}}, \quad (4)$$

$$l_{bpd} = l_{pt2} + \frac{\delta_{l(on)} \cdot E_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pm,\infty})}{\sigma_{p,max} \cdot \sigma_{pm,\infty}}. \quad (5)$$

Если в ф. (4) и (5) подставить выражение граничной величины втягивания каната по ф. (3), получаем достаточно простые выражения, пригодные для контроля:

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm,\infty}}{21} \cdot \varnothing, \quad (6)$$

$$l_{bpd} = l_{pt} + \frac{1}{7} (\sigma_{pd} - \sigma_{pm,\infty}) \cdot \varnothing. \quad (7)$$

В исследованиях *Walwaren и Merx* [20] показано, что формулы (6) и (7) достаточно хорошо описывают длину зоны передачи напряжений и длину анкеровки в плитах безопалубочного формирования.

Параметрические исследования, выполненные *Akesson* [14] для плит безопалубочного формирования высотой 215 мм; 265 мм и 380 мм, армированных семипроволочными канатами  $\varnothing = 12,9$  мм, показали, что при средней передаточной прочности бетона 47,5 Н/мм<sup>2</sup> ( $C^{30/37}$ ) в знаменателе ф. (6) следует принимать не 21, а 38 (т.е. длина зоны передачи напряжений составляет около  $26\varnothing$ ). Полученные результаты были подтверждены опытами по втягиванию канатов, выполненных *Tassi и Giltoft* [14].

Следует отметить, что расчетная зависимость (2), внесенная в СНБ 5.03.01 [5] и вслед за EN 1992-1-1 [10], могут быть преобразованы к подобному виду. Так, принимая для канатов  $\eta_{p2} = 3,2$ ;  $\alpha_2 = 0,19$ ;  $\alpha_1 = 1,25$ ;  $\eta_1 = 1,0$ , зависимость (2) получает вид:

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm,0}}{13,5 \cdot f_{ctd}(t)} \cdot \varnothing. \quad (8)$$

При средней передаточной прочности 40 Н/мм<sup>2</sup> знаменатель выражения (8) становится равным 39,2.

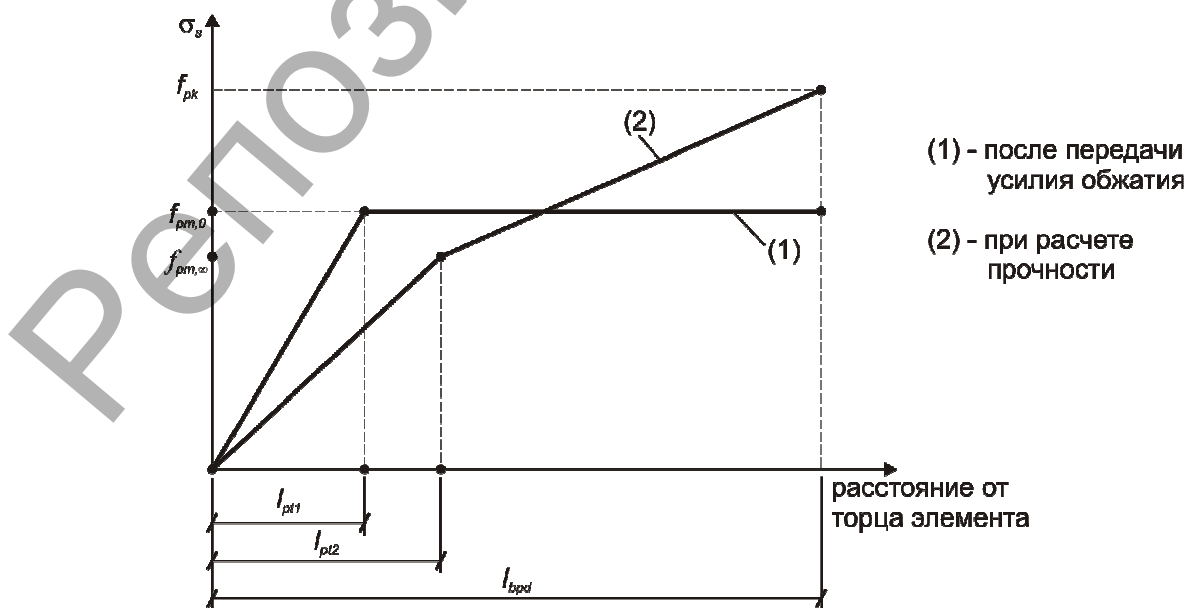


Рис. 1. К определению длины анкеровки напрягающей арматуры  $l_{bpd}$  согласно [5]

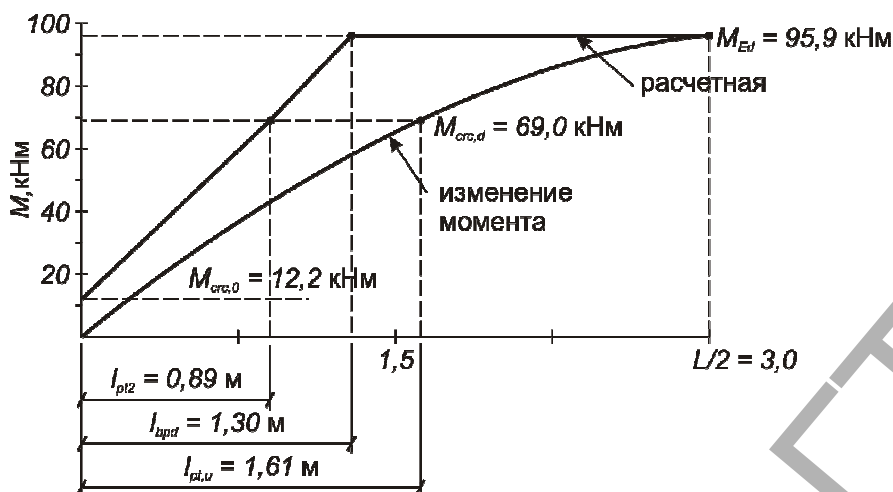


Рис. 2. Диаграмма усилий при расчете плиты безопалубочного формирования по прочности

Таблица 4. Результаты лабораторных испытаний стальных арматурных канатов Ø9 мм (9К7-1500-П-С по ГОСТ 13840)

№ п/п	Маркировка	Масса, кг	Расчётная длина l <sub>0</sub> , мм	Конечная расчётная длина l <sub>к</sub> , мм	Начальная площадь поперечного сечения F <sub>0</sub> , мм <sup>2</sup>	Фактическое разрывное усилие, кН	Разрывное усилие по ГОСТ 13840-86, кН	Фактическое временное сопротивление разрыву, Н/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву σ <sub>в</sub> по ГОСТ 13840-86, Н/мм <sup>2</sup>	Фактическое усилие при условном пределе текучести R <sub>0,2</sub> , кН	Усиление при условном пределе текучести R <sub>0,2</sub> , по ГОСТ 13840-86, кН	Фактический условный предел текучести, σ <sub>0,2</sub> , Н/мм <sup>2</sup>	Условный предел текучести, σ <sub>0,2</sub> по ГОСТ 13840-86, Н/мм <sup>2</sup>	Фактическое относительное удлинение перед разрывом, %	Относительное удлинение перед разрывом по ГОСТ 13840-86, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	2,50	-	-	53	98,53	≥93,5	1860	≥1770	92,90	≥79,5	1750	≥1500	5,5	≥4
2	2	2,50	-	-	53	99,86		1885		93,12		1755		6,0	
3	3	5,50	-	-	53	98,43		7855		92,32		1740		5,5	
4	4	2,50	-	-	53	98,66		1860		91,84		1730		5,5	
5	5	2,50	-	-	53	99,22		1870		92,31		1740		6,0	

Безусловно, что выполнять подобные перерасчеты возможно лишь в тех случаях, когда требуется оценить фактическую несущую способность изготовленного изделия.

В связи с этим на стадии проектирования следовало бы построить для группы изделий (например, под одну полезную нагрузку) соответствующие диаграммы усилий (см. рис. 2), а из них назначить контрольные значения втягивания канатов.

На рис. 2 в качестве примера представлена диаграмма усилий для свободно опертой плиты безопалубочного формирования длиной 6 м, шириной 1,5 м, армированной 6Ø12 Y1860S7 ( $f_{pk} = 1770$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{pm,\infty} = 1044$  Н/мм<sup>2</sup>), загруженной равномерно распределенной расчетной нагрузкой  $q = 14,2$  кПа.

В соответствии с представленной диаграммой расчетная величина втягивания каната не должна превышать  $\delta_{all} = 1,88$  мм при действии равномерно распределенной нагрузки. В свете представленного примера ограничение, принятое в СТБ 1383 [21], является близким к допустимому. Ситуация может несколько усугубиться при появлении в приопорной зоне сосредоточенных сил, создающих градиенты на эпюре моментов, что создает опасность образования трещин нормального отрыва не только на участке длины анкеровки, но и зоны передачи напряжений.

**3. Экспериментальные исследования длины зоны передачи напряжений для плит безопалубочного формирования, выполненные в заводских условиях**

**3.1. Методика проведения исследования.** Экспериментальные исследования выполняли непосредственно в заводских условиях производства плит пустотного настила безопалубочного формирования. В качестве опытных образцов были использованы плиты безопалубочного формирования, изготовленные по технологии «Weiler-Italia». Плиты имели ширину 1,2 м, были армированы напрягающими канатами Ø9 с маркировкой 9К7-1500-П-С по ГОСТ 13840 (изготовитель ОАО «Силур» Россия). Стабилизирующие напрягающие элементы выполняли из проволоки Ø5 S1400 по СТБ 1706. Результаты стандартных испытаний напрягающих канатов приведены в табл. 4.

Максимально установленные начальные напряжения с учетом потерь для плит безопалубочного формирования составляют  $\sigma_{pm,0} = 1100$  МПа.

Контроль прочности бетона осуществляется по контрольным образцам – кубам размером 100x100x100 мм. Формование контрольных образцов осуществляется в процессе приготовления дорожки (рис. 2.12). Испытания образцов-кубов выполняли в соответствии с ГОСТ 10180. Результаты испытаний представлены в таблице 5.

После выполнения подготовительных операций, предусмотренных технологическим процессом изготовления, на участке длиной 0,5 м (для образцов КС 50.9-10, КС 50.9-15, КС 50.9-20, КС 50.9-25, КС 50.9-30) и 1,0 м (для образцов КС 100.9-35, КС 100.9-40), на натянутых арматурных канатах устраивали изоляционную оболочку, исключавшую сцепление напрягаемого элемента на длине согласно рис. 3. Длины участков с исключенным сцеплением изменялись от 115 мм до 400 мм

Таблица 5. Результаты контроля прочности бетона

Опытный образец	Результаты испытаний прочности бетона $f_{ch}$ , МПа							
	1 сутки (передаточная прочность)				28 суток			
	1	2	3	среднее, $f_{cm,1}$	1	2	3	среднее
Плита П1	42,4	42,6	42,7	42,6	48,4	50,6	51,3	50,1

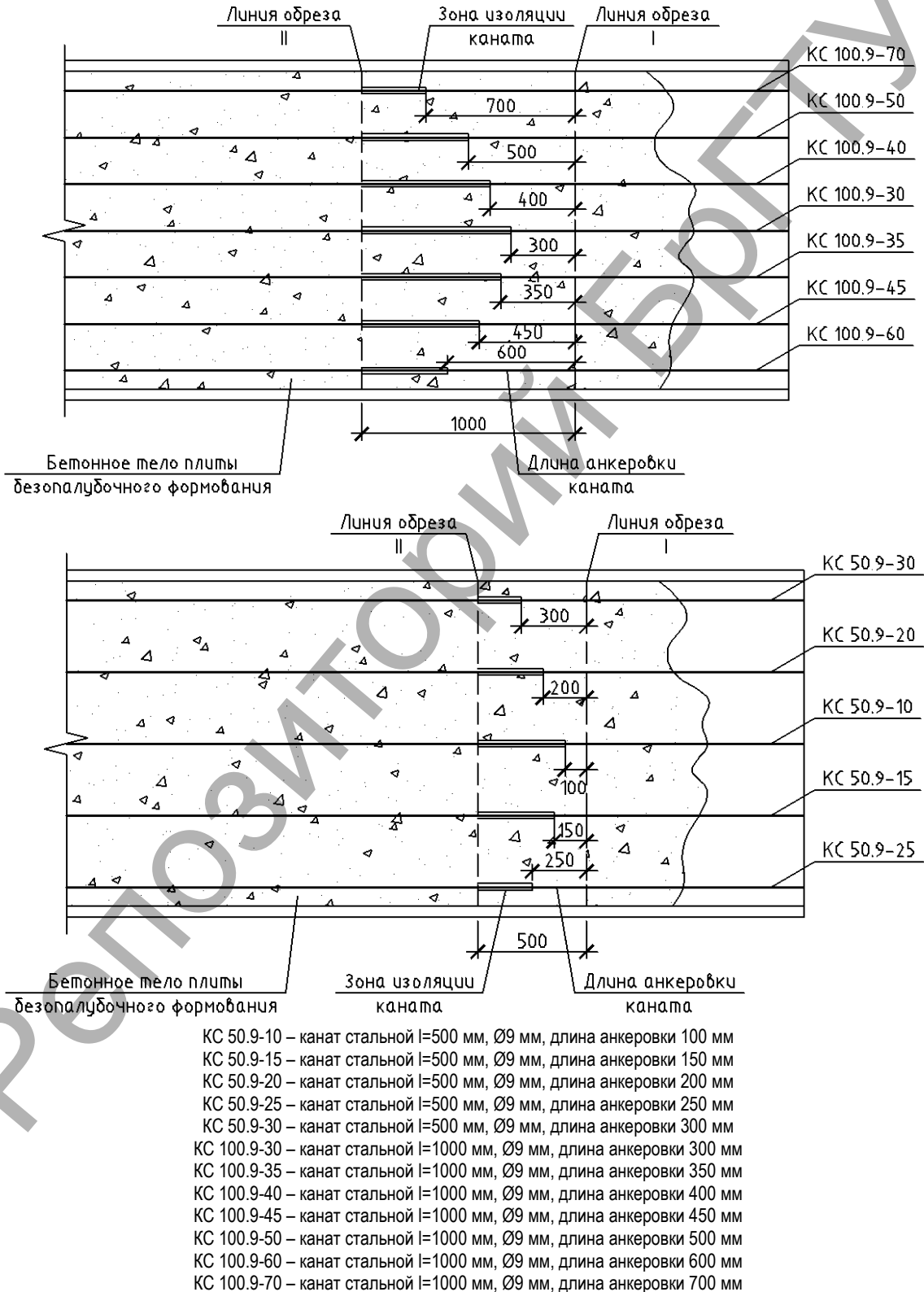


Рис. 3. Технологические схемы изготовления опытных образцов длиной 500 мм и 1000 мм соответственно

и составляли от 37.8% до 131.3% теоретического значения базовой длины зоны передачи напряжений, рассчитанной согласно СНБ 5.03.01 [5] и требованиям EN 1168 [24] и EN 13369 [23].

Места установки изолирующих оболочек помечали на формующей дорожке для того, чтобы затем определить места реза плит.

После формования дорожки плит последние выдерживались до набора требуемой передаточной прочности (не менее 40 Н/мм<sup>2</sup>) (см. табл. 5).

После набора требуемой передаточной прочности осуществлялась резка плит в следующей очередности: 1. Обрезали плиту на свободной стороне дорожки со стороны участков, на которых напрягающие канаты имели сцепление с бетоном; по полученной плоскости реза выполняли измерение величины втягивания каната, получая отпечатки на техническом пластилине.

2. Осуществляли резку плиты на расстоянии 0,5 м (для образцов КС 50.9-10, КС 50.9-15, КС 50.9-20, КС 50.9-25, КС 50.9-30) и 1,0 м (для образцов КС 100.9-35, КС 100.9-40), по сечению, совпадающему с тем, где заканчивались изолирующие элементы. Осуществляли замер величины втягивания каната для полного массива плиты на длине всей дорожки. Данный отсчет являлся эталонным для определения величины втягивания каната.

Для измерения величины втягивания канатов была разработана и апробирована собственная оригинальная методика, включавшая следующие этапы: 1. После того, как была выполнена резка плиты по намеченному сечению, в местах установки канатов выполняли слепки из технического пластилина, фиксируя полную картину втягивания каната (см. рис. 4), включая распределение перемещений по отдельным проволокам каната. Полученные слепки помещали в специальный контейнер с водой.

3. В лабораторных условиях для измерения величины втягивания использовали специальный триангуляционный лазерный датчик, установленный на штативе (см. рис. 5).

Измерения проводили с точностью 0,01 мм.

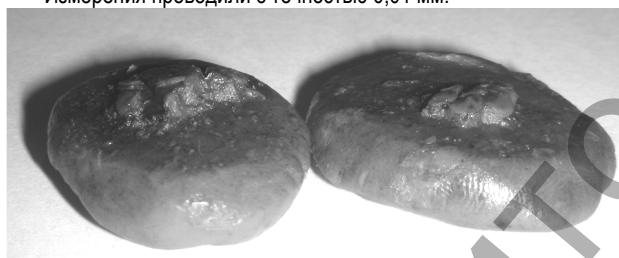


Рис. 4. Слепки из технического пластилина



Рис. 5. Триангуляционный лазерный датчик, установленный на штативе

Триангуляционный лазерный датчик предназначен для бесконтактного измерения и контроля положения, перемещения, размеров, профиля поверхности, деформаций, вибраций, сортировки, расположения технологических объектов; измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов.

На выполненных слепках, при помощи триангуляционного лазерного датчика, установленного в штатив, определялось превышение рельефа втягивания каждого отдельного стержня арматурного каната над уровнем тела бетона торцевого спила.

**3.2 Результаты испытаний и их анализ.** Результаты измерений величины втягивания канатов приведены в табл. 6 и показаны графически на рис. 6.

В соответствии с требованиями EN 13369 [23] измерение величины втягивания определяли как среднее значение трех последовательных измерений отдельных соседних проволок, расположенных по окружности, начиная от проволоки, имевшей максимальное втягивание.

Исходя из зафиксированных значений средней величины втягивания канатов  $\bar{\Delta}_{m,i}$  (см. табл. 6), определяли величину напряжений в канате на свободном участке. Рассматривая условия равновесия на фрагменте плиты длиной 0,5 м (для образцов КС 50.9-10, КС 50.9-15, КС 50.9-20, КС 50.9-25, КС 50.9-30) и 1,0 м (для образцов КС 100.9-35, КС 100.9-40) и принимая, что к моменту передачи усилия обжатия напряжения в канате по результатам измерений составляли  $\sigma_{pm,0} = 1050$  Н/мм<sup>2</sup>, относительная деформация для свободного каната составит:  $\epsilon_{pm,0} = 538,4 \cdot 10^{-5}$ , а абсолютное укорочение:

- для опытных образцов длиной 500 мм –  $\Delta l_{pm,0} = 2,69$  мм;
- для опытных образцов длиной 1000 мм –  $\Delta l_{pm,0} = 5,38$  мм.

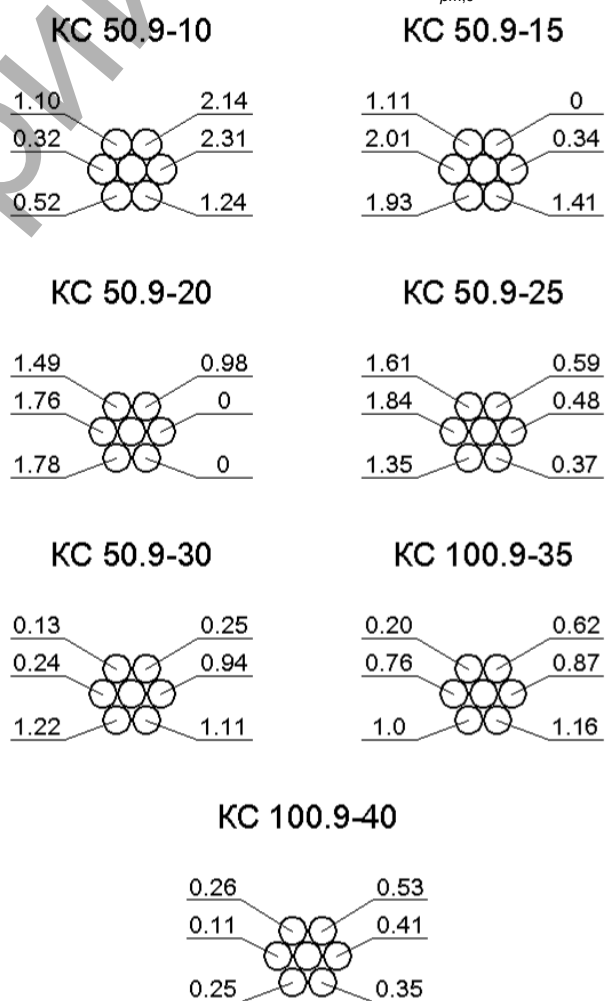


Рис. 6. Величины втягивания отдельных проволок арматурных канатов, в мм

Таблица 6. Результаты измерений величины втягивания канатов для опытных образцов

Марка образца	Величина втягивания отдельных проволок, мм						Среднее значение $\bar{\delta}_{m,i}$
	1	2	3	4	5	6	
КС 50.9-10	1,10	0,32	0,52	2,14	2,31	1,24	1,85
КС 50.9-15	1,11	2,01	1,93	0	0,34	1,41	1,78
КС 50.9-20	1,49	1,76	1,78	0,98	0	0	1,68
КС 50.9-25	1,61	1,84	1,35	0,59	0,48	0,37	1,35
КС 50.9-30	0,13	0,24	1,22	0,25	0,94	1,11	1,09
КС 100.9-35	0,20	0,76	1,0	0,62	0,87	1,16	0,97
КС 100.9-40	0,26	0,11	0,25	0,53	0,41	0,35	0,43

Таблица 7. Расчетные значения напряжений на свободных участках напрягающих канатов

Марка образца	Средняя величина втягивания каната $\bar{\delta}_{m,i}$ , мм	Относительная деформация $\epsilon_{pm,0(exp)} \cdot 10^{-5}$	Напряжения в напрягаемом канате $\sigma_{pm,0(exp)}$ , Н/мм <sup>2</sup>
КС 50.9-10	1,85	370,0	721,4
КС 50.9-15	1,78	356,0	694,0
КС 50.9-20	1,68	336,0	654,0
КС 50.9-25	1,35	270,0	526,0
КС 50.9-30	1,09	218,0	425,0
КС 100.9-35	0,97	97,0	189,15
КС 100.9-40	0,43	43,0	83,85

Таблица 8. Результаты расчетов опытных значений усилий на свободном участке канатов и величины касательных напряжений

Марка образца	Напряжения в напрягаемом канате $\sigma_{pm,0(exp)}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Усилие в канате $F_{pm,0(exp)}$ , Н	Длина участка сцепления, $l_0$ , мм	Средние напряжения сцепления, $\tau_{j,m}$ , Н/мм <sup>2</sup>
КС 50.9-10	721,4	38234,2	115	12,89
КС 50.9-15	694,0	36782,0	170	8,39
КС 50.9-20	654,0	34662,0	213	6,31
КС 50.9-25	526,0	27878,0	273	3,96
КС 50.9-30	425,0	22525,0	313	2,79
КС 100.9-35	189,15	10024,9	350	1,11
КС 100.9-40	83,85	4444,05	400	0,43

По зафиксированной величине втягивания канатов могут быть определены относительные деформации и напряжения напрягаемой арматуры на свободном участке, не имеющем сцепления с бетоном.

Значения напряжений на свободном участке, полученные по величинам зафиксированных втягиваний, приведены в табл. 7.

Среднее значение касательных напряжений по длине участка, имевшего сцепление напрягаемого элемента с бетоном (принимая допущение о равномерном распределении напряжений на длине зоны активного сцепления), могут быть рассчитаны по формуле:

$$\tau_j = \frac{F_{pm,0(exp)}}{l_0 \cdot \pi \cdot \varnothing_{ном}} \quad (9)$$

где  $F_{pm,0}$  – усилие в напрягающем элементе на участке с отсутствующим сцеплением;

$\varnothing_{ном}$  – номинальный приведенный диаметр каната (в плитах  $\varnothing_{ном}=8,21$  мм);

$l_0$  – длина участка активного сцепления.

Результаты расчетов опытных значений усилий на свободном участке каната и величины касательных напряжений для различных длин активного сцепления обобщены в табл. 8.

Как видно из результатов, приведенных в табл. 8 касательные напряжения по контакту каната с окружающим бетоном при длине участка активного сцепления менее 300 мм составляют более 3,0

Н/мм<sup>2</sup>, что приводит к нарушению сцепления при  $\tau_{Rd} = 2,85 \frac{H}{MM^2}$

для бетона, имеющего среднюю прочность на сжатие  $f_{ctm} = 40 \frac{H}{MM^2}$  ( $f_{ctm} = 1,8 \frac{H}{MM^2}$ ).

$$f_{ctm} = 40 \frac{H}{MM^2} \quad (f_{ctm} = 1,8 \frac{H}{MM^2}).$$

Согласно преобразованной зависимости, связывающей длину зоны передачи напряжений с величиной втягивания напрягающего элемента на свободном торце изделия при передаче усилия обжатия, полученной И. Гийоном, определяли опытное значение длины зоны передачи напряжений  $l_{pt}$  по полученным экспериментальным величинам втягивания канатов, принимая значения коэффициентов  $\alpha = 2$ ;  $\alpha = 2,5$  (значения внесены в СТБ 13369):

$$l_{pt} = \alpha \frac{E_p}{\sigma_{pm,i}} \cdot \delta_e \quad (10)$$

где  $l_{pt}$  – опытная длина зоны передачи напряжений,

$\sigma_{pm,i}$  – напряжение в канате непосредственно перед передачей усилия обжатия на бетон,

$\delta_e$  – опытная величина втягивания каната,

$E_p$  – модуль упругости напрягающей арматуры.

По полученным результатам расчета построены схемы распределения передачи напряжения в опытных образцах, график зависимости величины втягивания канатов от длины активного сцепления канатов и графики зависимости опытных значений длины зоны передачи напряжений  $l_{pt}$  от опытных величин втягивания каната  $\delta_e$ , при  $\alpha = 2$ ;  $\alpha = 2,5$  (см. рис. 7).

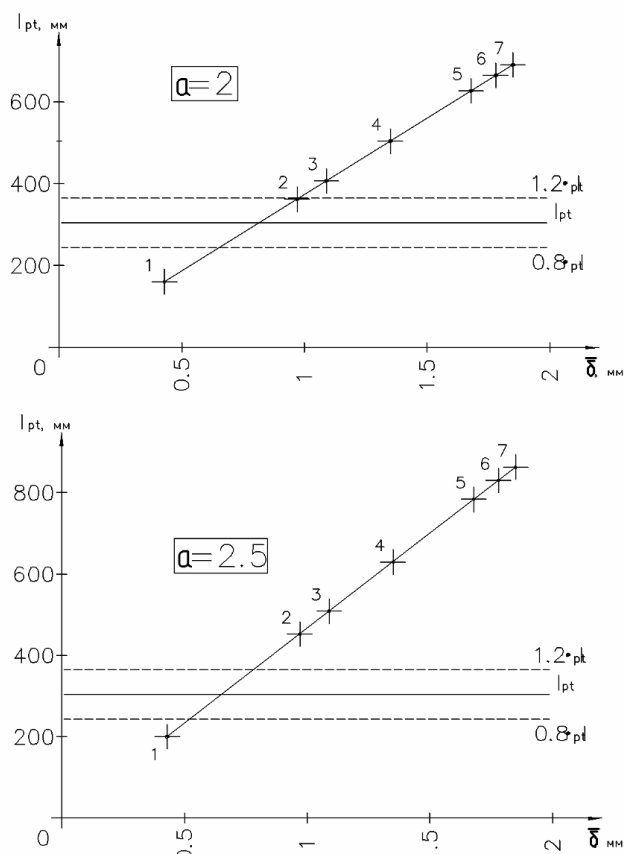


Рис. 7. Графики зависимости опытных значений длины зоны передачи напряжений  $l_{pt}$  от опытных величин втягивания каната  $\delta_m$ , при  $\alpha = 2$ ;  $\alpha = 2,5$  соответственно

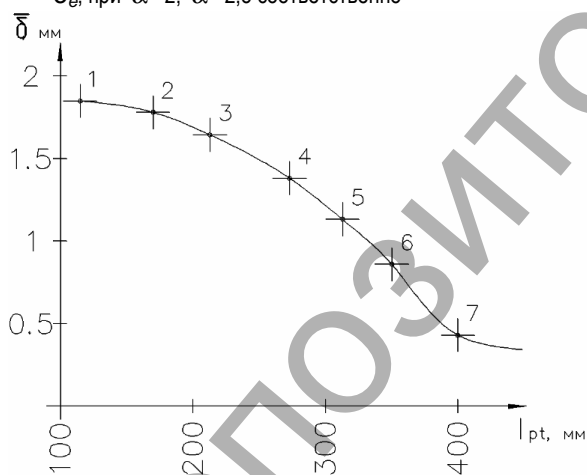


Рис. 8. График изменения величины втягивания канатов от длины активного сцепления канатов

Как видно из графиков, приведенных на рис. 7 при длине зоны активного сцепления более 160,5 мм, величина втягивания каната составила 0,43 мм, что равняется половине теоретического значения (по ф. 9) при  $\alpha = 2$ . Результаты измерений показали, что стабилизация величины втягивания каната (см. рис. 7) наступает при длине активного сцепления не менее 400 мм (линия перегиба графика на рис. 8). Поэтому, предварительно можно сделать вывод о том, что для условий конкретного производства на линии завода ЖБК (при  $f_{cm,0} = 40 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{pm,0} = 1100 \text{ Н/мм}^2$ ) длина зоны передачи напряжения достаточно близко соответствует расчетной, определенной по СТБ 5.03.01 [5] и ТКП EN 1992-1-1 [10] (Еврокод 2).

Как видно из графиков, приведенных на рис. 7, опытная длина зоны передачи напряжений, определенная для зарегистрированных значений втягивания канатов по формуле 9, при  $\alpha = 2,5$  ближе соответствует установленным опытным значениям. Таким образом, зависимости, рекомендованные для оценки качества изделий в процессе производства СТБ EN 13369 [23], в рамках которых критериальное значение допустимого втягивания рекомендовано определять при  $\alpha = 2,5$ , является обоснованным. Кроме того, как видно из графиков, представленных на рис. 3.2, для  $\alpha = 2$  и  $\alpha = 2,5$  средняя величина втягивания каната, превышающая  $\delta_m = 1 \text{ мм}$  для условия изготовления плит безопалубочного формирования, приводит к длине зоны передачи напряжений, большей, чем расчетные значения (верхний предел), определенные по СНБ 5.03.01 [5] и ТКП EN 1992-1-1 [10]. В связи с этим утверждение п.4.8.12 СТБ 1383 [21] выглядит необоснованным и не может быть применено при контроле качества плит безопалубочного формирования.

**Заключение.** Проведенные предварительные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Опытные значения длины зоны передачи напряжений для плит безопалубочного формирования, изготовленных по технологии «Weiler-Italia», при параметрах технологического процесса  $f_{cm,0} = 40 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{pm,0} = 1100 \text{ Н/мм}^2$  составляют не менее 300 мм, что близко соответствует расчетным значениям  $l_{pt}$ , определяемым по СНБ 5.03.01 [5] и ТКП EN 1992-1-1 [10] ( $l_{pt,нр} = 304,6 \text{ мм}$ ).
2. Принятые при контроле плит безопалубочного формирования критериальные значения допустимых втягиваний при  $\alpha = 2,5$  по СТБ EN 13369 [23] являются обоснованными и дают теоретический результат, близкий к опытному.
3. Для плит безопалубочного формирования, изготовленных по технологии «Weiler-Italia» в условиях завода ЖБК, допустимая средняя величина втягивания для каната  $\varnothing 9 \text{ мм}$  не должна превышать  $\delta_m = 1 \text{ мм}$ , что соответствует верхнему значению длины зоны передачи напряжений. Приведенные исследования показали, что требования п.4.8.12 СТБ 1383 [21]  $\delta_m \leq 2 \text{ мм}$  не являются обоснованными и не могут быть использованы при контроле производства пустотных плит безопалубочного формирования.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пецольд, Т.М. Безопалубочное формирование на длинных стендах предварительно напряженных многупустотных плит / Т.М. Пецольд, В.В. Тур // Строительная наука и техника. – 2006. – № 6. – С. 27–30.
2. Крамарь, В.Г. Влияние заземления в стенах на прочность и трещиностойкость панелей безопалубочного формирования / В.Г. Крамарь, К.М. Арзуманян, А.Я. Эпп [и др.] // Бетон и железобетон. – 1983. – № 2. – С. 8–9.
3. Заключение об особенностях работы многупустотных плит стендового безопалубочного формирования в составе здания и о возможных конструктивных решениях, позволяющих применять плиты в кирпичных блочных домах повышенной этажности. – М.: НИИЖБ, 2003.
4. Gyon (1951) – Béton Précontraint. – Paris, 1951.
5. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01.
6. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01–84\*.
7. ACI Manual 318R–86 art. 12.9 – Interim, 1990 – USA – 278 p.
8. AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials/ Standard Specification for Highway Bridges.– 16<sup>th</sup> Edition, Washington D.C., 1996 – art. 9.28.
9. British Standard BS8110: Part 1: 1997, Section Four, art. 4.10.
10. EN 1992–1–1. General Rules and Rules for Buildings: Section Four, art. 4.10.
11. NEN6720–1991. NNI Netherlands, art. 9.7, page 203.
12. PN–84/B–03264, art. 8.2.3.
13. DIN 1045, art. 8.4.1.
14. Bond of reinforcement in concrete. State-of-art prepared by Task Group Bond Models (former CEB Task Group 2.5/fib report 100 (2000) – August, 2000. – Ch. 6 – 120 p.



15. Bruggeling A.S.G. Transmission of prestress by bond/ Internal Report of TG9.4 to Commission. – 2000. – 37 p.
16. Bruggeling. Manual "Theorie en Praktijk van het vo orgespannen beton", 2 volumes 10050 p.– t. Koggeschip.
17. Bruggeling. The transmission length of pretensioning prestressed steel. Proceeding Tenth International Congress of FIP, part 4, NewDelhi, India, 1986, page 117/127.
18. Lopez M.R., Carmo N.F. Bond of prestressed strands to concrete: transfer rate and relationship between transmission length and tendon draw-in/ Structural Concrete. – 2002. – N 3. – P. 117–126.
19. PCI Manual for the design of Hollow Core Slabs/ Second Edition, PCI, Chicago, 1988. – 120 p.
20. Quality Assurance and Recommended Connections of Prestressed Hollow Core Slabs – BSI, London, 1998.
21. Плиты покрытий и перекрытий железобетонные для зданий и сооружений. Технические условия: СТБ 1383.
22. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования: СНиП 2.03.01–84\*.
23. Common rules for precast concrete products: EN 13369.
24. Precast Concrete Products – Hollow Core Slabs: EN 1168:2006.

Материал поступил в редакцию 02.02.12

#### TUR V.V., BASOV A.V. Normalization of size slippages in strands of hollow core slabs based on the results factory tests

The theoretical and normative approaches to determination of transmission zone length and characteristics determination of transmission zone length of hollow core slabs. The experimental study transmission zone length of strands was made at the precast concrete plant.

УДК 69.022

Галалюк А.В., Деркач В.Н.

### ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СЖАТИИ

**Введение.** В стеновых конструкциях каменная кладка обычно работает в условиях одноосного, в том числе и внецентренного, сжатия. Однако в ряде случаев возникает необходимость оценки прочности кладки с учетом работы в условиях плоского напряженного состояния. В таких условиях, например, работает стеновое заполнение каркасов при перекосе в плоскости стен, перегородки, опирающиеся на гибкие диски перекрытий, конструктивные элементы кладки, выполненные из материалов различной деформативности и т.д. Для того чтобы оценить напряженно-деформированное состояние указанных конструкций, требуется знание деформационных характеристик каменной кладки, связь между напряжениями и деформациями для которой в условиях плоского напряженного состояния записывается в виде (1).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}} \begin{bmatrix} E_x & \mu_{yx}E_x & 0 \\ \mu_{xy}E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \mu_{xy}\mu_{yx})G_{xy} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $E_x, E_y$  – модули упругости вдоль и поперек горизонтальных растворных швов;

$\mu_{xy}, \mu_{yx}$  – коэффициенты Пуассона вдоль и поперек горизонтальных растворных швов;

$G$  – модуль сдвига.

В соответствии со СНиП II-22-81 [1] модуль упругости (начальный модуль деформаций) кладки  $E_0$  при кратковременной нагрузке определяется по формуле (2) и численно равен тангенсу угла наклона касательной к кривой зависимости « $\sigma$ – $\varepsilon$ » в точке, соответствующей  $\sigma=0$ .

$$E_0 = \alpha R_u \quad (2)$$

В формуле (2)  $\alpha$  – упругая характеристика кладки, которая зависит от вида кладочных элементов, вида и прочностных показателей кладочного раствора,  $R_u$  – временный предел прочности каменной кладки при сжатии. Значения  $\alpha$ , приведенные в [1] определены только для случая сжатия кладки перпендикулярно горизонтальным растворным швам.

Согласно Еврокоду 6 [2] кратковременный модуль упругости  $E$  каменной кладки является секущим модулем и определяется в процессе испытаний в соответствии с EN 1052-1 [3]. Величина кратко-

временного модуля равна тангенсу угла наклона секущей, проходящей через точки кривой, соответствующие ординатам  $\sigma=0$  и  $\sigma=0,33f$ . При отсутствии результатов испытаний, полученных в соответствии с [3], значение кратковременного модуля упругости  $E$  допускается определять по зависимости (3).

$$E = K_E f_k \quad (3)$$

Числовые значения для коэффициента  $K_E$  устанавливаются в национальном приложении к [2]. Рекомендуемое [2] значение  $K_E = 1000$ . При этом в [2] коэффициент  $K_E$  принят одинаковым при действии сжимающего усилия вдоль и поперек горизонтальных растворных швов.

Значения коэффициентов поперечной деформации каменной кладки в нормах [1, 2] отсутствуют.

Каменная кладка, работающая в условиях плоского напряженного деформированного состояния, обычно рассчитывается как изотропный материал. Вследствие этого модуль сдвига ( $G$ ) для каменной кладки определяется из зависимости (4).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

где  $E$  – модуль упругости каменной кладки;

$$\nu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad \text{– коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона);}$$

$\varepsilon_x$  – относительные поперечные деформации;

$\varepsilon_y$  – относительные продольные деформации

В нормах [1] и [2] модуль сдвига  $G$  каменной кладки устанавливается по зависимости (5):

$$G = 0,4 E \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости каменной кладки при сжатии.

Принимая линейную зависимость между напряжениями и деформациями для каменной кладки, как изотропного материала, из выражения (4) получим величину коэффициента Пуассона  $\nu = 0,25$ .

**Галалюк Антон Владимирович**, младший научный сотрудник филиала Республиканского унитарного предприятия «Институт БелНИИС» Научно-технического центра.

**Деркач Валерий Николаевич**, кандидат технических наук, заместитель директора филиала Республиканского унитарного предприятия «Институт БелНИИС» Научно-технического центра.

Беларусь, РУП «Институт БелНИИС», 224023, ул. Московская, 267/2.