

УДК 624.012

## КОНТРОЛЬ ДЛИНЫ ЗОНЫ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР*  
(Брестский государственный технический университет);  
**Н.Д. РЯБЕНКО**  
(Полоцкий государственный университет)

*Исследуются зависимости, связывающие длину зоны передачи напряжений и величину втягивания напрягающих элементов. Данному вопросу посвящено достаточно много работ различных исследователей, однако проблема по-прежнему остается неразрешенной в полной мере. Рассмотрены зависимости, связывающие длину зоны передачи напряжений с величиной втягивания каната по предложениям различных исследователей. Учитывая то обстоятельство, что к настоящему времени не предложены другие обоснованные методы контроля длины зоны передачи напряжений, метод, основанный на измерении втягивания каната, при всех его недостатках по-прежнему остается базовым при производстве большинства элементов с напрягаемой арматурой, в частности плит безопалубочного формования. Для контроля длины зоны передачи напряжений по величине втягивания канатов в процессе изготовления плит безопалубочного формования могут быть использованы зависимости, рекомендованные стандартом EN 13369.*

В теории предварительно напряженных конструкций принято считать, что измерение величины втягивания каната на торце напрягаемого элемента является непрямым (косвенным) методом оценивания длины зоны передачи напряжений. Следует отметить, что в основном все стандарты, включая и стандарт EN 1168 [23], регламентирующие требования к проектированию и изготовлению многопустотных плит безопалубочного формования, предполагают этот метод контроля. Основные факторы, влияющие на величину длины зоны передачи напряжений, были подробно рассмотрены в [25].

Вместе с тем, несмотря на то, что получению зависимостей, связывающих длину зоны передачи напряжений и величину втягивания напрягающих элементов, посвящено достаточно много работ различных исследователей, проблема по-прежнему остается неразрешенной в полной мере.

### 1. Базовые зависимости, связывающие величину втягивания напрягающего элемента и длину зоны передачи напряжений

Экспериментально-теоретические исследования, выполненные И. Гийоном (Guyon, 1951), позволили получить следующую зависимость, связывающую длину зоны передачи напряжений с величиной втягивания напрягающего элемента на свободном торце изделия при передаче усилия обжатия:

$$l_{pt} = \alpha \frac{\delta_e}{\varepsilon_{p,i}}, \quad (1)$$

где  $l_{pt}$  – длина зоны передачи напряжений;  $\delta_e$  – величина втягивания каната на свободном торце изделия;  $\varepsilon_{p,i}$  – относительная деформация каната непосредственно перед передачей усилия обжатия;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от принятого закона сцепления и соответственно распределения напряжений в арматуре на длине зоны передачи напряжений.

Гипотетически И. Гийон рассматривал два случая:

1) напряжения в канате на длине зоны передачи напряжений распределены линейно ( $\alpha = 2$ ), что означает равномерное распределение напряжений сцепления;

2) напряжения в канате на длине зоны передачи напряжений распределяются по параболе, а напряжения сцепления – линейно с нисходящей ветвью (рис. 1), что подтверждалось опытным путем.

Исходное уравнение (1) может быть преобразовано к виду:

$$l_{pt} = \alpha \frac{E_p}{\sigma_{pm,i}} \delta_e, \quad (2)$$

где  $E_p$  – модуль упругости напрягающей арматуры;  $\sigma_{pm,i}$  – напряжение в канате непосредственно перед передачей усилия обжатия на бетон.

Следует отметить, что на протяжении ряда лет вопрос, связанный с выбором закона распределения напряжений в напрягающем элементе на длине зоны передачи напряжений, остается наиболее дискуссионным.

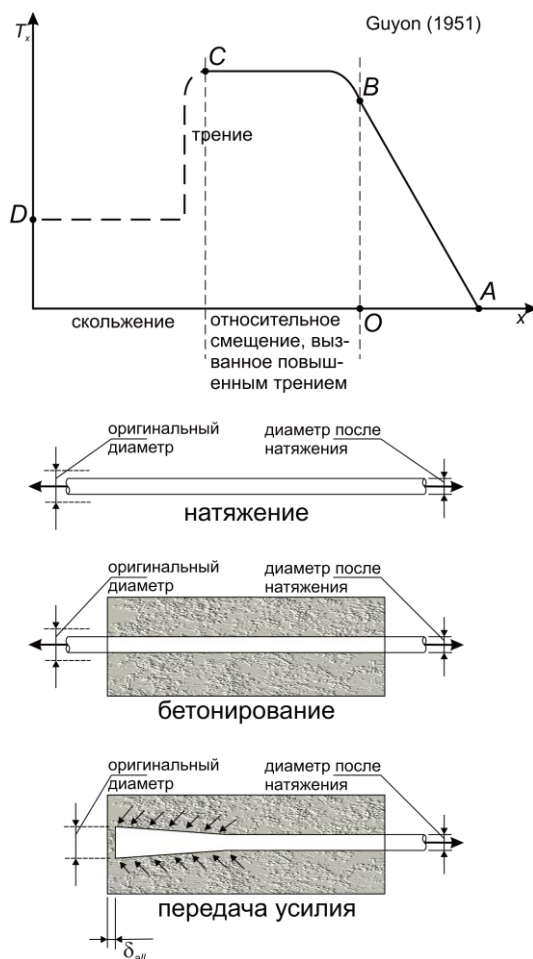


Рис. 1. Диаграмма усилия сцепления на длине зоны передачи напряжений согласно И. Гийону (1951) и «эффект Хойера» («Hoyer effect») при передаче усилия обжатия с напрягающего каната на бетон [3]

В таблице 1 представлены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между длиной зоны передачи напряжений и величиной втягивания каната на свободном торце.

Таблица 1

Зависимости, связывающие длину зоны передачи напряжений с величиной втягивания каната по предложениям различных исследователей [20]

№ п/п	Источник	Зависимость
1	Marshall, Krishnamurthy (1969)	$l_{pi} = \sqrt{\frac{\delta}{K}}$ где $K = 0,0000035 \text{ мм}^{-1}$ для семипроволочных канатов $\varnothing = 12,7 \text{ мм}$
2	Balázs (1992)	$l_{pi} = 105 \cdot \varnothing^4 \sqrt{\frac{\delta^{3/2}}{f_c'}}$
3	Balázs (1993)	$l_{pi} = \frac{111 \cdot \delta^{0,625}}{f_{ci}^{0,15} \left( \frac{f_{pi}}{E_p} \right)^{0,4}}$
4	Rose, Russel (1997)	$l_{pi} = 2\delta \frac{E_p}{f_{pi}} + 137,16$

В общем случае теоретическая величина втягивания каната может быть определена:

$$\delta_e = \Delta_{ps} - \Delta_c = \int_0^{l_{pt}} [\varepsilon_{si} - \varepsilon_s \cdot x] dx - \int_0^{l_{pt}} \varepsilon_c \cdot x \cdot dx, \quad (3)$$

где  $\Delta_c$  и  $\Delta_{ps}$  – полное упругое укорочение соответственно бетона и каната на длине зоны передачи напряжений.

При линейном распределении напряжений, а соответственно, и относительных деформаций в напрягающей арматуре и окружающем бетоне по длине зоны передачи напряжений величина втягивания каната на свободном торце элемента из уравнения (3) равняется площади заштрихованного треугольника на рисунке 2, что является графической интерпретацией широко применяемого уравнения:

$$\delta_e = \frac{\sigma_{pm,i}}{2E_p} l_{pt}. \quad (4)$$

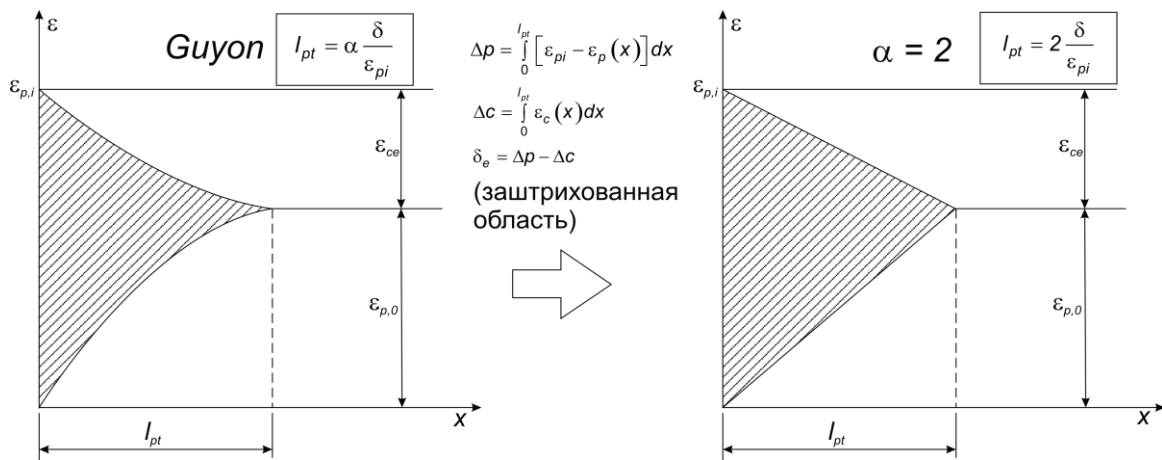


Рис. 2. К выводу зависимости « $l_{pt} - \delta$ »

Как уже отмечалось ранее, линейное распределение напряжений по длине зоны передачи напряжений дает теоретическое решение для  $\alpha = 2$ . Вместе с тем опытные данные, относящиеся к испытанию элементов с канатной арматурой, показывают, что, с одной стороны, приведенное теоретическое решение при  $\alpha = 2$  дает как консервативный результат, когда речь идет об определении базовой длины зоны передачи напряжений, применяемой далее при расчетах по предельным состояниям первой и второй групп, так и неконсервативный результат в том случае, когда выполняется расчет некоторых предельно допустимых значений втягивания, применяемых при контроле качества изделий.

Как следует из представленного выше уравнения (4), величина втягивания каната линейной зависит от базовой длины зоны передачи напряжений. Поэтому, завышая расчетное значение длины зоны передачи напряжений, завышается и контрольное значение величины втягивания каната  $\delta_e$ . Вместе с тем назначение некоторых предельных значений втягивания канатов, применяемых в процессе производственного контроля, при использовании зависимостей типа (4) выглядит достаточно простым и привлекательным. Так, измеряя величину втягивания каната по торцам изделия, в процессе производства можно контролировать значения длины зоны передачи напряжений. Однако, как показано в работах [20, 21], зависимости типа (4) плохо применимы для элементов с низким качеством сцепления, где значительное влияние оказывают локальные потери сцепления на концах каната (см. рис. 1). В этом случае значительное локальное втягивание каната, полученное по результатам измерения, может привести к неверному оцениванию и завышению длины зоны передачи напряжений. При этом дополнительные погрешности могут вносить неточности измерения малых величин втягивания, а также неодинаковые смещения отдельных проволок, входящих в канат.

Учитывая то обстоятельство, что к настоящему времени не предложены другие обоснованные методы контроля длины зоны передачи напряжений, метод, основанный на измерении втягивания каната, при всех его недостатках по-прежнему остается базовым методом при производстве большинства элементов с напрягаемой арматурой, и в частности плит безопалубочного формования.

Таким образом, при установлении допустимого значения вытягивания каната при использовании зависимости вида (2) необходимо обоснованно принять:

- контролируемое значение длины зоны передачи напряжений  $l_{pt}$ ;
- значение коэффициента  $\alpha$ .

В соответствии с требованиями пункта 4.2.3.2.4 EN 13369 [24], относящегося к нормированию предельной величины вытягивания напрягающих элементов на свободном торце изделия, в процессе производственного контроля должны выполняться следующие условия:

- для отдельного каната

$$\delta_e \leq 1,3\Delta L_0; \quad (5)$$

- среднее значение для всех канатов

$$\delta \leq \Delta L_0. \quad (6)$$

При этом в качестве контрольной величины вытягивания для канатов  $\delta_e$  следует принимать среднее из трех последовательных измерений проволок, расположенных по окружности.

В условиях (5) и (6) значение  $\Delta L_0$  (мм) согласно EN 13369 следует определять по формуле:

$$\Delta L_0 = 0,4 \frac{\sigma_{pm,0}}{E_p} l_{pt2}, \quad (7)$$

где  $l_{pt2}$  – верхнее значение расчетной длины зоны передачи напряжений, равное  $1,2 \cdot l_{pt}$ , в соответствии с требованиями норм [4, 8].

Несложно заметить, что в формуле (7) для вычисления  $\Delta L_0$  согласно EN 13369 [24] применяется множитель 0,4, соответствует коэффициенту  $\alpha = 2,5$  в зависимости (2), предложенной И. Гийоном.

## 2. О выборе значения коэффициента $\alpha$

Следует отметить, что на протяжении целого ряда лет вопрос, связанный как с установлением обоснованного значения коэффициента  $\alpha$  в зависимости (2), так и с выбором альтернативной зависимости, связывающей длину зоны передачи напряжений с величиной вытягивания напрягаемого элемента, остается наиболее дискуссионным и открытым. В таблице 2 представлена выборка наиболее известных предложений, относящихся к назначению величины коэффициента  $\alpha$  при использовании базового выражения (2).

Таблица 2

Значения коэффициента  $\alpha$  в формуле (2) И. Гийона по предложениям различных исследователей [20]

Источник	Коэффициент $\alpha$	
FIP (1982)	4,0	Индикативное значение при мгновенной (быстрой) передаче усилия обжатия
Guyon (1953)	3,0	Гипотетически
FIP (1982)		Принятое значение при $f_{pt}$ , непосредственно после передачи усилия
Olesniewicz (1975)	2,86	Экспериментально
FIP (1978)	2,86	Экспериментально
RILEM (1979)	2,8	Принятые значения
IRANOR (1982)		
LCPC (1999)		
Balázs (1993)	$2/(1-b)^\alpha$	Теоретические исследования
den Uijl (1998)	от 2,3 до 2,6	Экспериментально-теоретические исследования
Jonsson (1992)	2,5	Принятое значение
Guyon (1953)	1,0	Гипотетически
Brooks et al (1988)		
Balogh (1992)		
Russel and Burns (1996)		
Logan (1997)		
Steinberg et al (2001)		
Oh and Kim (2000)		
Wan et al (2002)		
CEB-FIP (1993)		
Rose and Russel (1997)		
den Uijl (1998)		
fib (2000)		
Lopes and Carmo (2002)		

Последние исследования, выполненные J.R. Marti-Vargas и другими учеными [20], показывают, что среди зависимостей, представленных в таблице 1, наилучший результат в сравнении с опытными данными дает наиболее простая зависимость И. Гийона (2) с коэффициентом  $\alpha = 2,44$  (табл. 3). При этом было установлено, что при изменении величины вытягивания в достаточно широком диапазоне (в зависимости от прочностных характеристик бетона, распределения напрягающих элементов в сечении и т.д.) были получены близкие значения длины зоны передачи напряжений. Кроме того, область изменения значений длины зоны передачи напряжений для одной и той же величины вытягивания каната довольно широкая (рис. 3).

Таблица 3

Сравнение опытных и расчетных значений длины зоны передачи напряжений согласно [20]

Зависимость	Среднее $l_{pt,cal} / l_{pt,meas}$	Коэффициент корреляции $R^2$
(1) таблица 2	1,18	0,07
(2) таблица 2	1,17	0,54
(3) таблица 2	1,11	0,35
(4) таблица 2	1,01	0,21
формула И. Гийона с $\alpha = 2,44$	0,95	0,20

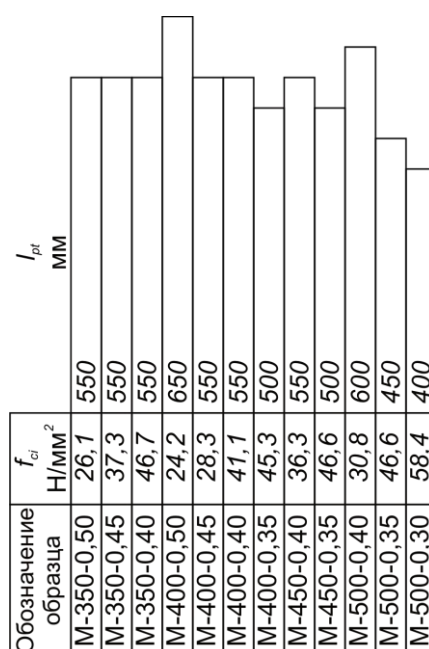


Рис. 3. Опытные значения длины зоны передачи напряжений, полученные в [20] для канатов  $\varnothing 12,7$  мм при  $\sigma_{pm,i} = 1395$  МПа,  $\sigma_{pm,\infty} = 1116$  МПа,  $E_p = 196700$  МПа

В исследованиях [20] сделан вывод о том, что к оценке длины зоны передачи напряжений по величине вытягивания каната на свободном конце следует относиться достаточно осторожно.

Введение коэффициента  $\alpha = 2,5$  при назначении граничного значения величины вытягивания каната согласно EN 13369 [24] при выполнении производственного контроля дает более консервативный результат по сравнению с теоретическим решением  $\alpha = 2$  и приближается к значению, полученному экспериментально  $\alpha = 2,44$  в опытах [20] при широком варьировании значений базисных переменных, входящих в развернутую расчетную модель [4, 8].

### 3. Расчетные модели для определения длины зоны передачи напряжений

При назначении граничного значения вытягивания каната при контроле в соответствии с зависимостями (5) и (6) важным элементом является выбор расчетной модели для вычисления длины зоны передачи напряжений.

Следует отметить, что в нормативных документах различных стран на протяжении ряда лет было принято выражать длину зоны передачи напряжений по отношению к номинальному диаметру  $\beta_b$ . В таблице 4 представлены для сравнения рекомендуемые расчетные значения длины зоны передачи напряжений, выраженные по отношению к номинальному диаметру, по требованиям различных норм.

Таблица 4

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 [6] канат $\varnothing$ 12,5 мм	1450	183 / 11,2	135 / 8,4	нет данных
ACI-318R [5]	1400	66 / 3,5*	66 / 3,5	66 / 3,5
BS 8110 [7]	$\leq 0,75 \cdot f_{pk}$	44 / 2,3	38 / 1,7	34 / 1,4
EN 1992-1 [8]	$\geq 1200$	70 / 3,5	60 / 2,7	нет данных
NEN 6720 [9]	1450	66 / 4,0	59 / 3,6	нет данных
PN 84/B [10]	1350	78 / 4,4	61 / 3,5	нет данных
СНиП 2.03.01 [26]	1000	63 / 3,6	53 / 2,9	–

\*) После черты приведены соответствующие средние значения втягивания каната  $\delta_{e,m}$ , мм (при  $\varnothing_{ном} = 12$  мм)

Повышенная длина зоны передачи напряжений, принятая в американских нормах, базируется на результатах исследований Cousins, Zia и Johnston [15], выполненных во второй половине 80-х годов прошлого столетия. Исследования показали, что нормы ACI 318 [5] недооценивают как длину зоны передачи напряжений, так и длину анкеровки канатов. Так, по сравнению со значением  $l_{pt} = 50\varnothing$ , принятым в ACI 318, измеренная длина зоны передачи напряжений для канатов  $\varnothing = 12,7$  мм составила от 1250 мм (99,4 $\varnothing$ ) до 1880 мм (148 $\varnothing$ ). По результатам этих исследований федерация FHWA опубликовала меморандум, в соответствии с которым канаты диаметром 15,2 мм были запрещены к применению без анкеров, а длина анкеровки увеличена на 60 %.

Отметим, что результаты измерений длины зоны передачи напряжений, выполненных различными авторами (табл. 5), имеют значительный разброс для одинакового диаметра каната при близких прочностных характеристиках бетона к моменту передачи усилия обжатия и близких усилиях обжатия. Это, на наш взгляд, объясняется, главным образом, несовершенствами использованных методик измерения длины зоны передачи напряжений по зафиксированным относительным деформациям бетона. Как было показано ранее (см. раздел 2), измерения, выполненные по методике [20], позволили получить еще более противоречивые данные.

Таблица 5

Экспериментальные значения длины зоны передачи напряжений для канатов  $\varnothing = 12,5$  мм по данным различных исследователей [22]

№ п/п	Исследователь, источник	Тип передачи усилия обжатия	Средняя передаточная прочность бетона $f_{cm}(f)$ , Н/мм <sup>2</sup>	Кол-во опытов	Длина зоны передачи напряжений $l_{pt}$ , мм		
					L*	A	H
1	Hanson, Kaag (1959)	Резка пламенем	36,61	17	–	660,4	–
2	Kaag и др. (1963)	Резка пламенем	23,72	10	812,8	962,7	1104,9
3	Hanson (1969)	Резка пламенем	34,19	2	–	609,6	–
4	Consins и др. (1990)	Резка пламенем	29,92	20	812,8	1262,4	1879,6
5	Malik (1990) Russel, Burns	Резка пламенем	24,68	12	558,8	1066,8	1625,6
6	Unay и др. (1991) Russel, Burns	Резка пламенем	30,2	34	406,4	762,0	1117,6
7	Shahawy и др. (1992)	Резка пламенем	35,23	12	749,3	764,5	812,8
8	Mitchell и др. (1993)	Постепенная передача усилия	40,47	14	330,2	500,38	711,2
9	Consins и др. (1993)	Резка пламенем	44,88	27	685,8	1153,2	1727,2
10	Deatherage и др. (1994)	Резка пламенем	34,2	16	457,2	602,0	914,4
11	Byuno Hwan Oh и др. (2001) (monostrand)	Постепенная передача (одиночный канат)	35,0	20	–	651,0	–
12			45,0	20	–	548,0	–
13	Byuno Hwan Oh и др. (2002) (twinstrand)	Постепенная передача (одиночный канат)	35,0	20	–	661,0	–
14			45,0	20	–	577,0	–
15	J. Marti-Vargas и др. (2007)	Постепенно, пошагово по методу ECADA **	от 26,1 до 54,8	48	400,0	515,0	550,0

В первые редакции ЕС-2 (ENV-1992) были внесены таблицы, по которым длину зоны передачи напряжений предлагалось также нормировать в отношении к номинальному диаметру каната в зависимости от величины передаточной прочности бетона и вида напрягающего элемента (табл. 6). При этом переход к расчетным значениям длины зоны передачи напряжений, как и в EN 1991-1-1 [8], осуществляется с использованием коэффициентов 0,8 и 1,2 к базовому значению, где наиболее неблагоприятное значение определяется применительно к расчетной ситуации (рис. 4).

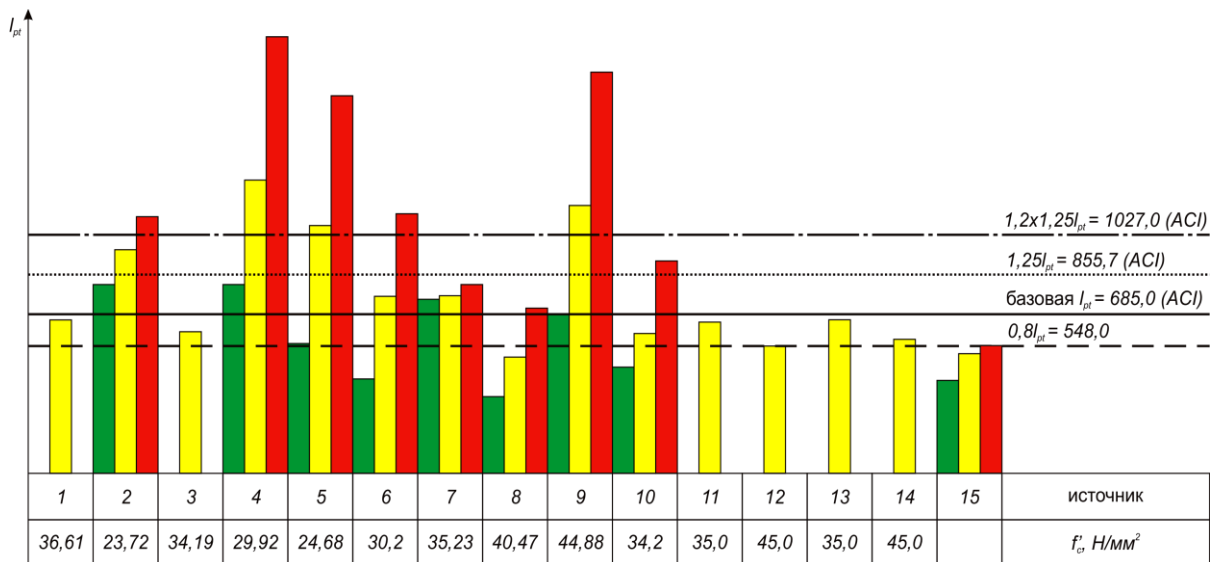


Рис. 4. Сравнение базовых и расчетных значений величин длины зоны передачи напряжений

Таблица 6

Значения коэффициента  $\beta_b$   
для расчета базовой длины зоны передачи напряжений согласно EN 1992-1-2

Средняя прочность бетона к моменту передачи усилия обжатия, в МПа		25	30	35	40	45	50
$\beta_b$	канаты, гладкая проволока	75	70	65	60	55	50
	рифленая проволока	55	50	45	40	35	30

Представленный выше подход, в рамках которого базовая длина зоны передачи напряжений определяется произведением  $l_{pt} = \beta_b \cdot \varnothing$ , имеет ряд недостатков, главное – не учитывает следующие параметры:

- начальное натяжение канатов (указано, что приведенные в таблицах 4, 6 данные справедливы для максимально возможного натяжения, но ничего не говорится о снижении длины зоны передачи напряжений для более низких уровней натяжения);
- способ передачи усилия обжатия (плавно/мгновенно, хотя показано, что способ передачи усилия обжатия может оказывать существенное влияние на длину зоны передачи напряжений);
- различия в условиях сцепления в зависимости от положения напрягающих элементов в изделии;
- различия в условиях сцепления при втягивании («push-in») и вытягивании («push-out») каната (ситуация «push-in» определена при передаче усилия обжатия, а «push-out» – при анкеровке в предельном состоянии по прочности);
- различия в условиях сцепления канатов и гладких проволок.

Следует отметить, что при определении нормируемых значений  $\beta_b$ , внесенных в ENV 1992-1-2, было использовано параболическое распределение напряжений на длине зоны передачи напряжений, в то время как в EN 1992-1-2 [8], вслед за МС90, принято, по утверждению авторов [16], «более реалистичное» линейное распределение. При этом окончательная редакция EN 1992-1-2 (п. 8.10.2) [8] содержит метод расчета, практически полностью повторяющий метод МС90 (п. 6.9.11) (табл. 7).

Согласно EN 1992-1-1 [8] и СНБ 5.03.01 [4] базовую длину зоны передачи напряжений следует определять по формуле:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \frac{\sigma_{pm,0} \cdot \varnothing}{\eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd} \cdot t}, \quad (8)$$

где  $\alpha_1 = 1,0$ ;  $\alpha_2 = 0,19$ ;  $\eta_1 = 1,0$ ;  $\eta_{p1} = 3,2$  – для канатов;  $f_{ctd}(t)$  – расчетное сопротивление бетона на растяжение к моменту времени  $t$ , соответствующему передаче усилия обжатия.

Таблица 7

Сравнение расчетных зависимостей  
для определения длины зоны передачи напряжений по МС90 и EN 1992-1-1

Параметр	МС90, п. 6.9.11	EN 1992, п. 8.10.2
Базовая длина анкеровки	$l_{bp} = \frac{A_{sp} \cdot f_{pd}}{\pi \varnothing \cdot f_{bpd}};$ где $\frac{A_{sp}}{\pi \varnothing} = \left(\frac{1}{4}\right) \varnothing$ – для круговых; $\frac{A_{sp}}{\pi \varnothing} = \left(\frac{7}{36}\right) \varnothing$ – для 7-проволочных канатов; $f_{bpd}$ – расчетное значение прочности сцепления	Не используется как отдельный параметр в пункте 8.10.2
Прочность сцепления при передаче усилия обжатия	$f_{bpd} = \eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot f_{ctd}(t),$ где $\eta_{p1} = 1,4$ – для проволок; $\eta_{p1} = 1,2$ – для 7-проволочных канатов; $\eta_{p2} = 1,0$ – хорошие условия сцепления; $\eta_{p2} = 0,7$ – другие условия сцепления; $f_{ctd}(t)$ – расчетное значение прочности на растяжение	$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(t),$ где $\eta_{p1} = 2,7$ – для проволок; $\eta_{p1} = 3,2$ – для 7-проволочных канатов; $\eta_1 = 1,0$ – хорошие условия сцепления; $\eta_1 = 0,7$ – другие условия сцепления
Длина зоны передачи напряжений	$l_{bpt} = \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot l_{bp} \cdot \sigma_{pi} / f_{bpd},$ где $\alpha_8 = 1,0$ – плавно; $\alpha_8 = 1,25$ – мгновенно; $\alpha_9 = 1,0$ – для анкеровки; $\alpha_9 = 0,5$ – для передачи напряжений; $\alpha_{10} = 0,7$ – гладкие проволоки; $\alpha_{10} = 0,5$ – канаты; $\sigma_{pi}$ – напряжения в арматуре непосредственно после передачи усилия обжатия	$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \varnothing \cdot \sigma_{pi} / l_{bpt}$ где $\alpha_1 = \alpha_8$ , МС90; $\alpha_2 = 0,25$ – для круглых; $\alpha_2 = 0,19$ – для 7-проволочных канатов

Подставляя соответствующие значения коэффициентов в формулу (8) применительно к предварительному напряжению канатами, получаем базовую длину зоны передачи напряжений:

$$l_{pt} = 1 \cdot 0,19 \frac{\sigma_{pm,0}}{1,0 \cdot 3,2 \cdot f_{ctd} \cdot t} \varnothing = \frac{\sigma_{pm,0}}{16,84 \cdot f_{ctd} \cdot t} \varnothing. \quad (9)$$

Принимая для передаточной прочности бетона  $f_{c,cube}(t) = 40$  МПа значение  $f_{ctd}(t) = 1,35$  МПа, расчетная длина зоны передачи напряжений составит

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm,0}}{22,73} \varnothing. \quad (10)$$

Здесь уместно сравнить полученную зависимость (10) с зависимостью, предлагаемой АСІ 318 [5] для плит безопалубочного формования:

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm,\infty}}{20,7} \varnothing, \quad (11)$$

где  $\sigma_{pm,\infty}$  – напряжения в напрягаемой арматуре с учетом всех потерь (эффективные напряжения).

Как видно из сравнения, полученные зависимости дают достаточно близкий результат при передаточной прочности бетона не менее 40 МПа.



С учетом полученной длины зоны передачи напряжений ACI 318 [5] для плит безопалубочного формования предлагает определять два предельных значения величины втягивания канатов на базе зависимости (2):

$$\delta_{e.all} = \frac{1}{41,4} \frac{\sigma_{pm,i}}{E_p} \sigma_{pm,\infty} \cdot \emptyset \text{ при } \alpha = 2; \quad (12)$$

$$\delta_{e.all} = \frac{1}{62,1} \frac{\sigma_{pm,i}}{E_p} \sigma_{pm,\infty} \cdot \emptyset \text{ при } \alpha = 3. \quad (13)$$

Наиболее благоприятное значение выбирается в зависимости от расчетной ситуации.

Необходимо отметить, что СНБ 5.03.01 [4] и EN 19911-1 [8] также рекомендуют определять верхнее и нижнее значения длины зоны передачи напряжений ( $l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt}$  и  $l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt}$ ). Такие значения приняты на основании рекомендаций по результатам исследований Wölfel и Krüger [15] и предполагают учесть погрешности, возникающие по измеренным средним относительным деформациям бетона. Здесь следует обратить внимание на несколько необычную ситуацию, возникающую при определении такого важного показателя в законах сцепления, как прочность бетона на растяжение. Это подчеркивалось также и в работе [14].

Так, при определении расчетной длины зоны передачи напряжений в формуле (8) участвует расчетное сопротивление бетона к моменту времени  $t$ , определяемое в зависимости от средней прочности бетона  $f_{ctm}(t)$  согласно СНБ 5.03.01 по формуле:

$$f_{ctd} \ t = \frac{0,7 f_{ctm} \ t}{\gamma_c}. \quad (14)$$

Принимая условие, что передаточная прочность составляет не менее 80 % от прочности в возрасте 28 суток, получаем

$$f_{ctd} \ t = \frac{0,8 \cdot f_{ctk}}{\gamma_c}. \quad (15)$$

В этом случае введение  $\gamma_c = 1,5$  хотя и выглядит непонятным при расчете длины зоны передачи напряжений, но введено с определенной целью. С другой стороны, введение дополнительных коэффициентов 0,8 и 1,2 к базовой длине зоны передачи напряжений теряет смысл. Поэтому применительно к назначению контрольных величин втягивания канатов с использованием подходов, рекомендованных EN 1169 [23] для плит безопалубочного формования, в расчетных зависимостях (5) и (6) следует использовать не расчетную, а базовую длину зоны передачи напряжений, определенную при среднем, а не расчетном сопротивлении бетона на растяжение. При этом среднее значение сопротивления следует устанавливать по результатам испытания контрольных образцов к моменту передачи усилия обжатия. Тогда при передаточной прочности 40 МПа средняя прочность на растяжение должна составлять  $f_{ctm}(t) = 2,9$  МПа, а базовая длина зоны передачи напряжений

$$l_{pt} = 1 \cdot 0,19 \frac{\sigma_{pm,0}}{1 \cdot 3,2 \cdot 2,9} \emptyset = \frac{\sigma_{pm,0}}{48,8} \emptyset.$$

Для плит безопалубочного формования при максимально установленных начальных напряжениях с учетом потерь  $\sigma_{pm,0} = 1100$  МПа базовая длина зоны передачи напряжений составит

$$l_{pt} = \frac{1100}{48,8} = 22,5 \emptyset_{nom}. \quad (16)$$

Верхнее предельное значение  $l_{pt}$  с учетом отклонений ( $k = 1,3$ ) может быть принято равным

$$l_{pt} = 30 \cdot \emptyset_{nom}. \quad (17)$$

Данную величину возможно использовать при контроле плит безопалубочного формования при следующих условиях:

- величина передаточной прочности не менее  $f_{ctm}(t) = 40$  МПа;
- величина начальных напряжений после передачи усилия обжатия не более 1100 МПа.

На рисунке 5 представлено сравнение фактических и расчетных значений величин втягивания канатов, вычисленных с учетом принятых ранее предпосылок по СНБ 5.03.01 [4] и АСІ 318 [5] применительно к плитам безопалубочного формования. Опытные данные взяты из работы [20].

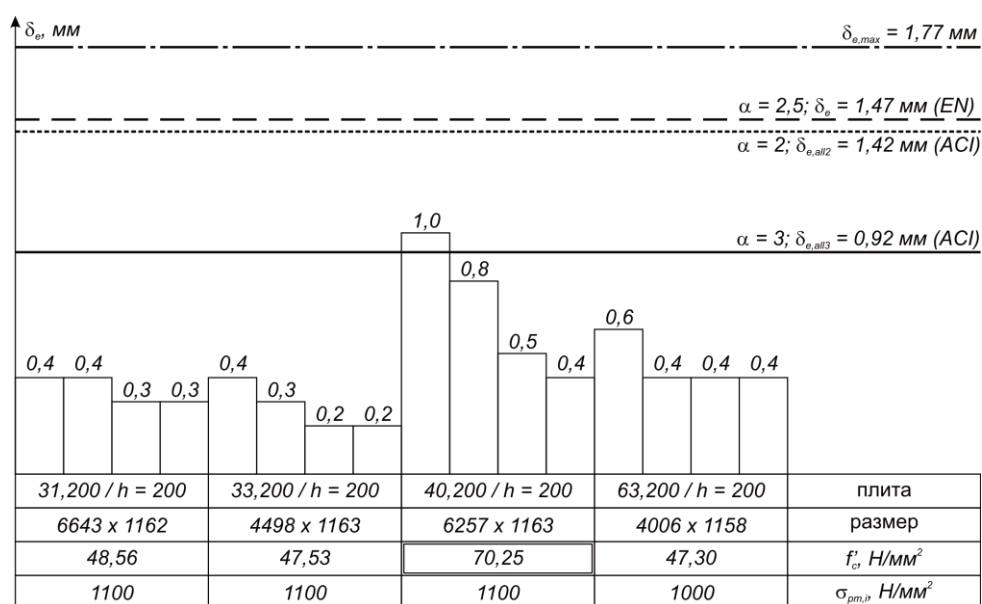


Рис. 5. Сравнение фактических и расчетных значений величин втягивания канатов

Как видно из представленного сравнения (см. рис. 5), обе методики дают достаточно консервативный результат при оценивании длины зоны передачи напряжений, применительно к результатам, полученным для канатов  $\varnothing = 12,7$  мм.

**Заключение.** Для контроля длины зоны передачи напряжений по величине втягивания канатов в процессе изготовления плит безопалубочного формования могут быть использованы зависимости, рекомендованные EN 13369 [24]. Принятие коэффициента  $\alpha = 2,5$  в формуле (2) И. Гийона (множитель 0,4 в формуле (5)) можно считать обоснованным, что подтверждается опытными данными [20]. В расчетной зависимости (8) следует использовать базовую длину зоны передачи напряжений, определенную при средней прочности бетона на растяжение к моменту времени, соответствующему передаче обжатия. Для оговоренных условий можно назначать при контроле  $l_{pr} = 30\varnothing_{ном}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пецольд, Т.М. Безопалубочное формование на длинных стендах предварительно напряженных многоспустотных плит / Т.М. Пецольд, В.В. Тур // Строительная наука и техника. – 2006. – № 6. – С. 27 – 30.
2. Gyon (1951) – Béton Précontraint, Paris, 1951.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01. – Минск, 2001.
4. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84\*. – М.: Госстрой СССР.
5. ACI Manual 318R-86 art. 12.9 – Interim, 1990 – USA – 278 p.
6. 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.
7. British Standard BS8110: Part 1: 1997, Section Four, art. 4.10.
8. EN 1992-1-1. General Rules and Rules for Buildings: Section Four, art. 4.10.
9. NEN6720-1991. NNI Netherlands, art. 9.7, page 203.
10. PN-84/B-03264, art. 8.2.3.
11. DIN 1045, art. 8.4.1.
12. 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.
13. Bruggeling, A.S.G. Transmission of prestress by bond: Internal Report of TG9.4 to Commission / A.S.G. Bruggeling, 2000. – 37 p.

14. Bruggeling, A.S.G. Theorie en Praktijk van het voorgespannen beton: Manual / A.S.G. Bruggeling, 2 vol. 10050 p. – t. Koggeschip.
15. Bruggeling, A.S.G. The transmission length of pretensioning prestressed steel / A.S.G. Bruggeling // Proceeding Tenth International Congress of FIP, part 4. – NewDelhi, India, 1986. – P. 117/127.
16. Lopez, M.R. Bond of prestressed strands to concrete: transfer rate and relationship between transmission length and tendon draw-in / M.R. Lopez, N.F. Carmo // Structural Concrete. – 2002. – № 3. – P. 117 – 126.
17. PCI Manual for the design of Hollow Core Slabs/ Second Edition, PCI, Chicago, 1988. – 120 p.
18. Quality Assurance and Recommended Connections of Prestressed Hollow Core Slabs – BSI. – London, 1998.
19. Плиты покрытий и перекрытий железобетонные для зданий и сооружений. Технические условия: СТБ 1383.
20. Reliability of Transfer Length Estimation from Strand End Slip / J.R. Marti-Vargas [et.] // ACI Structural Journal. – 2007. – July – August. – Technical Paper # 104 – S47. – P. 487 – 494.
21. Oh, B.H. Correct Prediction of Transfer Length in Pretensioned Prestressed Concrete Structures / B.H. Oh, E.S. Kim, S.K. Kim // Transactions, SMIRT16, Washington, DC, August 2001, Paper # 1545. – P. 1 – 8.
22. Rose, D.R. Investigation of Standardized Tests to Measure the Bond Performance of Prestressing Strand / D.R. Rose, B.W. Russel // PCI Journal. – 1997. – July – August. – P. 56 – 62.
23. EN 1168:2006 – Precast Concrete Products – Hollow Core Slabs.
24. EN 13369 – Common rules for precast concrete products.
25. Тур, В.В. О нормировании величины втягивания канатов при изготовлении плит пустотного настила по технологии безопалубочного формования / В.В. Тур, Т.М. Пецольд // Проблемы современного бетона и железобетона. – Ч. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 458 – 478.
26. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования: СНиП 2.03.01-84\*. – М.: Госстрой СССР, 1984.

Поступила 03.06.2010

#### **TRANSMISSION LENGTH CONTROL AT PRESTRESSED STRUCTURE MANUFACTURING**

**V. TUR, N. RYABENKO**

*Dependences connecting transmission length and value of retraction of stressing elements are investigated. Sufficiently many works of various researchers are devoted to the given question, however a problem in full still remains unsolved. Dependences connecting transmission length control at prestressed structure manufacturing at the suggestions of various researchers are observed. Taking the circumstances into account that to the present time it is not offered other proved inspection methods of transmission length control a method based on measurement of rope retraction at all its deficiencies still remains basic in manufacture of the majority of elements with a pretensioned reinforcement, in particular off-formwork molding slabs. For transmission length control at prestressed structure manufacturing on value of ropes retraction in course of off-formwork molding slabs manufacturing can be used dependences recommended by EN 13369.*