

# ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

---

---

УДК 691.328.1

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО СТЕРЖНЯ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ

*В. С. Федоров, Х. З. Баширов, В. Е. Левитский, В. Е. Сугрова*  
*Российский университет транспорта (МИИТ) (г. Москва, Россия)*

В теоретической литературе чаще всего, подробно приводятся расчетные зависимости, принципы алгоритмизации задач расчета, и в значительно меньшей степени уделяется внимание физическому обоснованию используемых формул исследований железобетонных составных конструкций. Практически отсутствуют расчетные модели, отражающие все многообразие различных типов наклонных трещин, не разработана математическая модель для определения проекций опасной наклонной трещины, как функции многих переменных; не нашли должного отражения исследования влияния основных факторов на сопротивление железобетонных составных конструкций.

**Ключевые слова:** железобетонный стержень, наклонные трещины, сопротивление сдвигу.

In the theoretical literature most often in detail describes the calculation based on the principles of algorithmization of calculation tasks, and to a much lesser extent focuses on the physical justification of formulas used concrete research composite structures. Almost places without the analysis model, reflecting the diversity of the different types of inclined cracks developed mathematical model to determine the threat projection of the inclined crack, as a function of many variables; not adequately addressed by studies of the impact of major factors on the resistance of reinforced concrete composite constructions.

**Keywords:** reinforced concrete core, the inclined cracks and shear resistance.

В России и странах зарубежья из всего разнообразия железобетонных составных конструкций наибольшее распространение по ряду объективных причин (эффективное применение сборного железобетона, значительные объемы строительства, технологический уровень производства железобетона и др.) получили сборно-монолитные решения балок, стеновых панелей и обычных ребристых плит покрытия, у которых поперечное сечения выполняется комплексным – из железобетона и сталефибробетона (под тяжелые нагрузки) или утолщенная полка которых изготовлена из

конструкционно-теплоизоляционного материала (поризованного керамзитобетона), а продольные и поперечные ребра – из тяжелого бетона.

Зональное размещение материалов в железобетонных составных конструкциях позволяет наряду с высокопрочными бетонами использовать бетоны пониженных классов и достичь экономии по расходу стали. Совершенно очевидно, что степень такой экономии и успех решения поставленных в работе задач в значительной мере зависит от предпосылок, положенных в основу решений и степени сложности математического аппарата, который при этом используется. Сегодня в теоретической литературе по избранной теме, чаще всего, подробно приводятся расчетные зависимости, принципы алгоритмизации задач расчета, и в значительно меньшей степени уделяется внимание физическому обоснованию используемых формул. Практически не затрагивались вопросы о физической природе происходящих при этом явлении и в подавляющем большинстве экспериментальных исследований железобетонных составных конструкций, где, как правило, ставились задачи получения количественных данных об их сопротивлении. Между тем, любому творчески мыслящему профессионалу важно не только формально рассчитать конструкцию, но и понимать почему используются та или другая зависимость, каков их физический смысл.

Одной из проблемных задач до настоящего времени продолжает оставаться расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям. И хотя в последние годы, в решении этой проблемы достигнут заметный прогресс, определилось новое направление, все же многие важные вопросы остаются неизученными, в частности применительно к исследованию прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных составных конструкций. Здесь практически отсутствуют расчетные модели, отражающие все многообразие различных типов наклонных трещин, не разработана математическая модель для определения проекций опасной наклонной трещины, как функции многих переменных; не нашли должного отражения исследования влияния основных факторов на сопротивление железобетонных составных конструкций и т. п.

В работе [1] предложена классификация трещин, в соответствии с которой в железобетонных изгибаемых элементах в зависимости от внешних силовых воздействий образуются трещины трех типов:

- Трещины первого типа: нормальные к продольной оси элемента, пересекающие продольную арматуру, и образуются на участках, где  $M \geq M_{crc}$ , а  $Q < Q_{crc}$ ;
- Трещины второго типа: наклонные к продольной оси элемента, пересекающие продольную и поперечную арматуру, и образуются на участках, где  $M > M_{crc}$  и  $Q \geq Q_{crc}$ ;
- Трещины третьего типа: наклонные к продольной оси элемента, пересекающие поперечную арматуру, образуются на участках, где  $M < M_{crc}$  и  $Q > Q_{crc}$ .

Здесь  $M_{crc}$  и  $Q_{crc}$  – изгибающий момент и поперечная сила, отвечающие исчерпанию сопротивления поперечных сечений, образованию трещин, соответственно нормальных (со стороны растянутой грани) и наклонных (на уровне нейтральной оси);  $M$  и  $Q$  – максимальные значения изгибающего момента и поперечной силы на рассматриваемом участке.

В результате анализа предложена расчетная модель сопротивления сдвигу железобетонного стержня [2], позволяющая найти точки соприкосновения разных (в том числе полярных) подходов к построению расчета прочности железобетонных конструкций по наклонным сечениям. На основании этой расчетной схемы появляется возможность анализа сопротивления железобетонной конструкции при наличии наклонных трещин разных типов.

Применительно к расчету прочности железобетонных конструкций по наклонным трещинам третьего типа представим расчетную схему [2] из пяти блоков (рис. 1), в виде расчетной схемы усилий и напряжений четвертого блока с некоторыми элементами пятого блока (рис. 2). При этом местные напряжения ( $\sigma_{x,loc}$ ,  $\sigma_{y,loc}$  и  $\tau_{xy,loc}$ ) в сечении 1–1 определяются в соответствии с формулами СП 63.13330.

Для определения напряженно-деформированного состояния в сечении 3–3 привлекается схема составного стержня.

Первый случай разрушения для наклонной трещины третьего типа соответствует условию достижения главными деформациями удлинения бетона  $\varepsilon_{b,3}$  своих предельных значений  $\varepsilon_{bt,ul}$  в сечении 2–2 над наклонной трещиной (рис. 2).

$$\varepsilon_{b,3} = \varepsilon_{bt,ul} \cdot \quad (1)$$

Тогда, используя для этой зоны формулы механики твердого деформируемого тела и выполняя алгебраические преобразования, получим формулу для определения  $\sigma_{x,2}$ :

$$\sigma_{x,2} = \frac{A_{1,\alpha} \cdot A_{2,\alpha} + A_{3,\alpha}}{A_{4,\alpha} \cdot A_{2,\alpha} + A_{5,\alpha}} \quad (2)$$

где

$$(R_{bt} \cos^2 \alpha - \varepsilon_{bt,ul} \cdot E_b \nu_b \cos^2 \alpha + R_{bt} \mu_b \cos^2 \alpha - R_{bt} \mu_b) = A_{1,\alpha}, \quad (3)$$

$$(2 \cos^2 \alpha + \sin 2\alpha \cdot \operatorname{tg} 2\alpha) = A_{2,\alpha}, \quad (4)$$

$$R_{bt} \cdot \mu_b \cdot \operatorname{tg} 2\alpha \sin 2\alpha = A_{3,\alpha}, \quad (5)$$

$$(\mu_b \cos^2 \alpha - \mu_b \sin^2 \alpha) = A_{4,\alpha}, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha \cdot \mu_b \sin 2\alpha = A_{5,\alpha}. \quad (7)$$

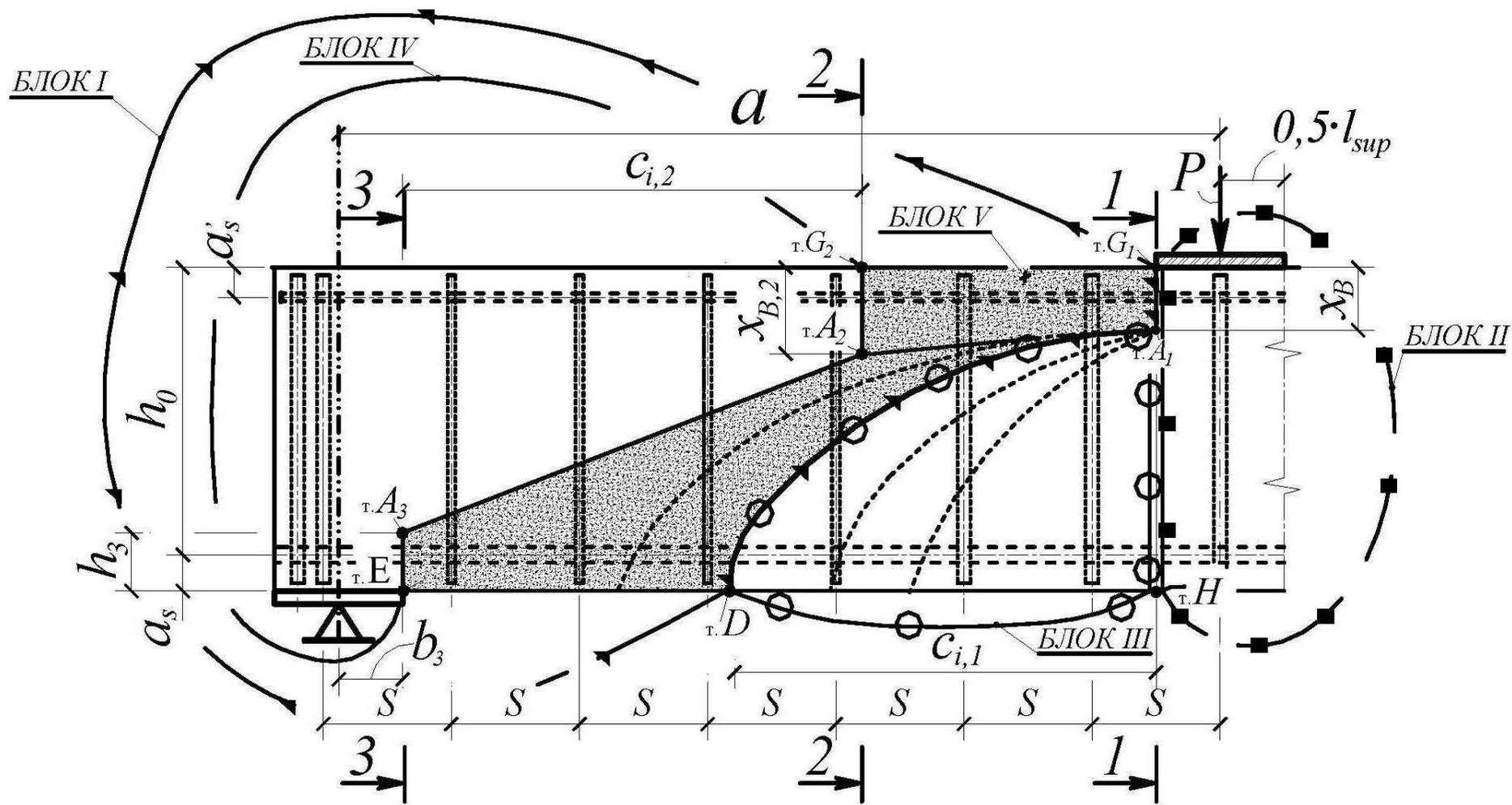


Рис. 1. Общая схема блоков и расчетные сечения, используемые для решения задачи прочности железобетонных конструкций по наклонным сечениям

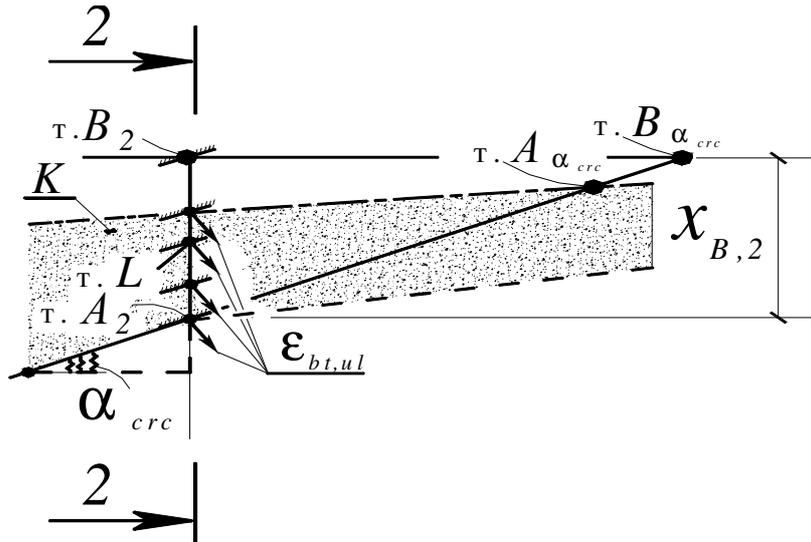


Рис. 2. Предельные деформации удлинения бетона на главных площадках в сечении 2–2 над наклонной трещиной третьего типа

Касательные напряжения в условиях плоского напряженного состояния «сжатия - растяжение» примут вид:

$$\tau_{xy,2} = \frac{\sigma_{x,2} \cdot \operatorname{tg} 2\alpha - R_{bt} \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{2 \cos^2 \alpha + \sin 2\alpha \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}. \quad (8)$$

При этом усредненный угол наклона главных площадок может быть принят равным  $\alpha = 0,5\alpha_{crc}$ .

В процессе итераций угол  $\alpha$  уточняется из зависимости:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h - h_3 - x_{B,2}}{c_3}. \quad (9)$$

Из уравнения проекций всех сил на ось  $OY$  для блока IV, расположенного сверху от ломанного сечения  $I_3 - A_3 - A_2 - B_2$ , определяем погонные усилия в хомутах  $q_{sw}$ , пересекаемых наклонной трещиной ( $\sum OY = 0$ ):

$$q_{sw} = \frac{R_{sup} - Q_{s,3} A_{s,3} - \omega_{\tau,3} \cdot \frac{R_{sup}}{h} \left( \frac{S}{I} + \varphi_{xy} \right) \cdot h_3 - \omega_{\tau,2} \cdot \tau_{xy,2} \cdot b \cdot x_{B,2}}{0,8c_3}. \quad (10)$$

Из уравнения моментов всех сил относительно точки L для блока IV, расположенного сверху от ломанного сечения  $I_3 - A_3 - A_2 - B_2$ , определяем напряжения в продольной арматуре  $\sigma_{s,3}$ , в сечении 3–3 ( $\sum M_L = 0$ ):

$$\sigma_{s,3} = \frac{R_{sup} \cdot (c_3 + b_3) - Q_{s,3} A_{s,3} c_3}{A_{s,3} \cdot (h_0 - 0,5x_{B,2})} +$$

$$+ \frac{-\omega_{\tau,3} \cdot \frac{R_{\text{sup}}}{h} \left( \frac{S}{I} + \varphi_{xy} \right) \cdot h_3 \cdot c_3 - 0,5q_{sw} \cdot c_3^2 - q_{sw,hor} \cdot c_3 \cdot 0,5 \cdot (h - h_3)}{A_{s,3} \cdot (h_0 - 0,5x_{B,2})} \leq m_{a,3} R_s \cdot (11)$$

Из уравнения моментов всех сил относительно точки О для блока IV, расположенного сверху от ломанного сечения  $I_3 - A_3 - A_2 - B_2$ , определяем опорную реакцию  $R_{\text{sup}}$  ( $\sum M_o = 0$ ):

$$R_{\text{sup}} \cdot (c_3 + b_3) - Q_{s,3} A_{s,3} c_3 - \omega_{\tau,3} \cdot \tau_{xy,3} \cdot b \cdot h_3 \cdot c_3 - \omega_{\sigma,2} \sigma_{x,2} \cdot b \cdot x_{B,2} \cdot (h_0 - 0,5x_{B,2}) - 0,5q_{sw} \cdot c_3^2 + q_{sw,hor} \cdot c_3 \cdot 0,5 \cdot (h - x_{B,2}) = 0 ..$$

Здесь

$$\tau_{xy,3} = \left( \frac{R_{\text{sup}} \cdot S}{I \cdot b \cdot h} + \frac{R_{\text{sup}}}{b \cdot h} \cdot \varphi_{xy} \right) \cdot (12)$$

где  $(\varphi_{xy})$  определяется в соответствии с рекомендациями СП 63.13330.

Отсюда следует:

$$R_{\text{sup}} = \frac{Q_{s,3} A_{s,3} c_3 + \omega_{\sigma,2} \sigma_{x,2} \cdot b \cdot x_{B,2} \cdot (h_0 - 0,5x_{B,2}) + 0,5q_{sw} \cdot c_3^2 - q_{sw,hor} \cdot c_3 \cdot 0,5 \cdot (h - x_{B,2})}{(c_3 + b_3) - \frac{\omega_{\tau,3}}{h} \left( \frac{S}{I} + \varphi_{xy} \right) \cdot h_3 \cdot c_3} \quad (13)$$

Записав функцию  $F(q_{sw}, \sigma_{s,3}, c_3, \lambda_1, \lambda_2)$  и отыскивая ее частные производные по соответствующим переменным, после алгебраических преобразований, получим:

$$D_{u,11} c_3^7 + D_{u,12} c_3^6 + D_{u,13} c_3^5 + D_{u,14} c_3^4 + D_{u,15} c_3^3 + D_{u,16} c_3^2 + D_{u,17} c_3 + D_{u,18} = 0 \quad (14)$$

Здесь,

$$\begin{aligned} & 0,32q_{sw} D_{u,1}^3 - 0,2q_{sw}^2 D_{u,1}^3 = D_{u,11}; \\ & 0,64D_{u,1}^3 D_{u,2} + 1,04q_{sw} D_{u,1}^2 b_3 - 0,4q_{sw} D_{u,1}^3 D_{u,2} - 0,4q_{sw}^2 D_{u,1}^2 b_3 - 0,4q_{sw} D_{u,1}^3 = D_{u,12}; \\ & -0,16D_{u,1}^3 D_{u,3} + 2,08 \cdot D_{u,1}^2 D_{u,2} b_3 + 1,12q_{sw} D_{u,1} b_3^2 - 0,4q_{sw} D_{u,1}^3 D_{u,3} - 0,8q_{sw} \cdot D_{u,1}^2 D_{u,2} b_3 - \\ & - 0,2q_{sw}^2 D_{u,1} b_3^2 c_3^5 - 0,2q_{sw} D_{u,1}^2 b_3 c_3^5 - 0,32 D_{u,1}^3 D_{u,4} c_3^5 = D_{u,13}; \\ & 2,08 \cdot D_{u,1}^2 D_{u,3} b_3 + 2,24 D_{u,1} D_{u,2} b_3^2 - 0,8q_{sw} D_{u,1}^2 D_{u,3} b_3 - 0,4q_{sw} D_{u,1} D_{u,2} b_3^2 + \\ & + 0,4q_{sw} b_3^3 - 0,4q_{sw} D_{u,1}^2 - 0,4D_{u,1}^2 D_{u,2} b_3 - 0,8D_{u,1}^2 D_{u,3} - 0,64D_{u,1}^2 D_{u,4} b_3 = D_{u,14}; \\ & 0,64D_{u,1} D_{u,3} b_3^2 - 0,4q_{sw} D_{u,1} D_{u,3} b_3^2 + 1,6 \cdot D_{u,1} D_{u,3} b_3^2 + 0,8 \cdot D_{u,2} b_3^3 - 0,4D_{u,1}^2 D_{u,2} - \\ & - q_{sw} D_{u,1}^2 b_3 - 0,4D_{u,1} D_{u,3} b_3 - 0,32D_{u,1} D_{u,4} b_3^2 = D_{u,15}; \\ & 0,8D_{u,3} b_3^3 - 0,5q_{sw} D_{u,1} b_3^2 - 2D_{u,1}^2 D_{u,2} b_3 - 0,8D_{u,1}^2 D_{u,4} b_3 = D_{u,16}; \\ & -q_{sw} D_{u,1} b_3 c_3 - D_{u,1} D_{u,2} b_3^2 c_3 - 2D_{u,1} D_{u,3} b_3 c_3 - 1,6D_{u,1} D_{u,4} b_3^2 c_3 = D_{u,17}; \\ & -D_{u,1} D_{u,2} b_3 - D_{u,3} b_3^2 - 0,8D_{u,4} b_3^3 = D_{u,18}; 0,64c_3^6 D_{u,1}^4 - 0,4q_{sw} D_{u,1}^4 = D_{u,6}; \\ & 2,72D_{u,1}^3 b_3 - 1,2q_{sw} D_{u,1}^3 b_3 = D_{u,7}; \\ & 4,32D_{u,1}^2 b_3^2 - 1,2q_{sw} D_{u,1}^2 b_3^2 = D_{u,8}; 2,4D_{u,1} b_3^3 + 0,64D_{u,1} b_3^3 - 0,4q_{sw} D_{u,1} b_3^3 = D_{u,9}; 0,8b_3^4 = D_{u,10}; \\ & \left( 1 - \frac{\omega_{\tau,3}}{h} \left( \frac{S}{I} + \varphi_{xy} \right) \cdot h_3 \right) = D_{u,1}; Q_{s,3} A_{s,3} - q_{sw,hor} \cdot 0,5 \cdot (h - x_{B,2}) = D_{u,2}; \end{aligned}$$

$$\omega_{\sigma,2} \sigma_{x,2} \cdot b \cdot x_{B,2} \cdot (h_0 - 0,5x_{B,2}) = D_{u,3}; \frac{Q_{s,3} A_{s,3} + \omega_{\tau,2} \cdot \tau_{xy,2} \cdot b \cdot x_{B,2}}{0,8} = D_{u,4};$$

$$\frac{q_{sw,hor} \cdot 0,5 \cdot (h - x_{B,2}) q_{sw,hor} \cdot 0,5 \cdot (h - h_3)}{A_{s,3} \cdot (h_0 - 0,5x_{B,2})} = D_{u,5}.$$

Физический смысл уравнения заключается в том, что оно позволяет среди множества возможных наклонных трещин из веера 2, отыскать ту, по которой несущая способность железобетонной конструкции будет минимальной.

Таким образом, предложена расчетная схема и разрешающие уравнения для решения задачи прочности железобетонных конструкций по наклонным трещинам третьего типа. Реальность разрушения по наклонным трещинам третьего типа в ряде случаев подтверждена экспериментально [3, 4].

### Список литературы

1. Гольшев А. Б., Колчунов В. И. Соппротивление железобетона. Киев : Основа, 2009. 432 с.
2. Федоров В. С., Баширов Х. З. Расчетная модель сопротивления сдвигу составного железобетонного стержня // Архитектура и строительство. 2017. № 1. С. 109–112.
3. Баширов Х. З., Крыгина А. М., Чернов К. М. Основные результаты экспериментальных исследований прочности железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям // Жилищное строительство. 2013. № 6. С. 32–37.
4. Новые строительные материалы и изделия: региональные особенности производства / Д. П. Ануфриев, Н. В. Купчикова, Н. А. Страхова, Л. П. Кортовенко, В. А. Филин, Е. М. Дербасова, С. С. Евсева, П. С. Цамаева. М. : Изд-во АСВ, 2014. 200 с.

УДК 624.154

## РАСЧЕТ ПИРАМИДАЛЬНЫХ СВАЙ НА ДЕЙСТВИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

*О. Б. Завьялова, Д. И. Каширский*  
*Астраханский государственный*  
*архитектурно-строительный университет (Россия)*

В отличие от обычных призматических свай постоянного сечения, расчет пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку требует большого объема вычислительной работы. Приходится учитывать изменяющееся с глубиной сечение свай, определять на каждом уровне изгибную и сдвиговую жесткость, условную ширину свай, жесткость упругих опор, которыми заменяется грунтовое основание. В статье рассмотрен сравнительный анализ расчета пирамидальной и призматической свай приведенного сечения на горизонтальные нагрузки. Получен коэффициент приведения средней ширины пирамидальной свай к ширине условной призматической свай постоянного сечения. Упругое основание моделировалось постелью Винклера. Расчет выполнялся с помощью компьютерной программы, основанной на методе перемещений с учетом узлового