

poroshka dlja asfal'tobetona [Use of ashes-ablation as the mineral powder for asphalt concrete]. Reshenie ekologicheskikh problem sovremenno-go obshchestva dlja ustoychivogo razvitiya. [The Decision of environmental problems of a modern society for a sustainable development: sb. Materials of the scientifically-practical conference devoted to 20-year-old anniversary of chair of ecology, wildlife management and biology] Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvjashchennoy 20-letnemu yubileyu kafedry ekologii, prirodopol'zovaniya i biologii. Omsk. LITERA. 2016. Pp. 134 – 138.

12. Sirotyuk, V.V. Standartizatsiya i perspektivy ispol'zovaniya zoloshlakov energetiki dlja dorozhnogo stroitel'stva v Rossii. [Standartizatsiya and use prospects zoloshlakov power for road building in Russia]. Zoloshlaki TES: udalenie, transport, pererabotka, skladirovanie. Materialy III nauchno-prakticheskogo seminar. [Zoloshlaki TES: removal, transport, processing, warehousing: m-ly III nauchn. – prakt. A seminar. 22 on April. 23rd 2010]. Moscow. Publishing house MEI, 2010. Pp. 58 – 59.

13. Stepanets, V.G., Isaenko, M.V., Gerasimov, A.V., Gerasimova, I.V. Opyt stroitel'stva dorozhnykh odezhd iz zolomineral'nykh smesey v Omskoy oblasti. [Opyt of building of road clothes with the bases from zolomineralnyh mixes in the Omsk region]. Highways. 2013. Pp. 93 – 94.

14. Nalimov, V.V., Chernova N.A. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov. [Century of Century Statistical methods of planning of extreme experiments]. Moscow. Statistika. 1992. 375 p.

15. Augambaev, M., Ivanov, A.Z., Terekhov, Ju.I. Osnovy planirovaniya nauchno-issledovatel'skogo eksperimenta. [Osnovy of planning of

research experiment]. Tashkent. Ukituvchi. 2004. 336p.

16. Prokopets, V.S., Galdina, V.D., Nadykto, G.I., Bedrin, E.A. Adgezionnaja prisadka BAP-DS-3 dlja dorozhnykh bitumov. [Adhesive additive BAP-DS-3 for road bitumens]. Konstrukcion materials. 2005. No. 10. Pp. 12 – 13.

17. Brodskiy, V.Z., Brodskiy, L.I., Golikova, T.I. Tablitsy planov eksperimenta dlya faktornykh i polinomial'nykh modeley. Spravochnoe izdanie. [Tables of plans of experiment for factorial and polynomial models. A reference media]. Moscow. Metallurgy. 1982. 752 p.

*Галдина Вера Дмитриевна (Омск, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы и специальные технологии» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: ver.galdina@yandex.ru)*

*Черногородова Мария Сергеевна (Омск, Россия) – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные, тяговые машины и гидропривод» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: www.mamarya@mail.ru)*

*Vera Dmitrievna Galdina (Omsk, Russian Federation) – candidate of technical sciences, the associate professor of Department «Construction materials and special technologies» of The Siberian automobile and highway universitet (SibADI) (644080, Omsk, Mira Avenue, 5, e-mail: ver.galdina@yandex.ru)*

*Marija Sergeevna Chernogorodova (Omsk, Russian Federation) – The post-graduate student of Department «Hoisting-and-transport, Traction Cars and Hydraulik Aktuator » of The Siberian automobile and highway universitet (SibADI) (644080, Omsk, Mira Avenue, 5, e-mail: www.mamarya@mail.ru)*

УДК 624.012.45.046

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКАЛЫВАНИЯ БЕТОНА В ЗОНЕ АНКЕРОВКИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ**

*Ю.В. Краснощёков*

**Аннотация.** В статье приведены результаты компьютерного моделирования опытных образцов, предназначенных для испытаний на выдергивание арматуры из бетона. Анализируется напряженное состояние бетона в зоне анкерования и определяются участки вероятного образования раскалывающих трещин при упругих деформациях материалов. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными. Для теоретического обоснования возможного раскалывания привлекаются задачи теории упругости о действии сосредоточенной силы в точке бесконечного тела и полупространстве.

**Ключевые слова:** железобетон, напряженное состояние, анкеровка арматуры, испытания, моделирование, раскалывание, срез, теория упругости.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цель данного исследования – выявление причин образования трещин раскалывания в зоне анкеровки ненапрягаемой арматуры при испытании по разным схемам и теоретическая оценка их влияния на разрушение анкеровки.

Появление на российском рынке арматуры с серповидным профилем потребовало пересмотреть расчетные зависимости с целью обеспечения необходимой надежности конструкций. Изменения в российских нормах в связи с этим вызвали широкую дискуссию по поводу нормирования и надежности прямой анкеровки арматуры [1]. В процессе дискуссии было выявлено, что существуют два подхода к модели взаимодействия арматуры периодического профиля и бетона. В американских нормах учитывается вероятность разрушения от раскалывания бетона, окружающего арматурный стержень. В отечественных нормах сделан упор на модель, в которой разрушение происходит срезом от нарушения сцепления арматуры с бетоном, хотя были известны факты, подтверждающие раскалывание бетона, окружающего арматуру периодического профиля [2].

Разрушение от раскалывания обычно связывают с образованием и развитием трещин вдоль арматуры. СНиП 2.03.01-84 предусматривал конструктивные меры при образовании вдоль анкеруемых стержней трещин от растяжения бетона. Однако условия образования таких трещин в зоне анкеровки нормы проектирования не оговаривали. В действующих нормах о возможности раскалывания бетона в зоне анкеровки ненапрягаемой арматуры вообще не упоминается.

Установлено, что разрушение срезом зависит от вида периодического профиля стержневой арматуры. О влиянии вида периодического профиля на разрушение раскалыванием пока нет достаточных данных. В работе [3] утверждалось, что стержневая арматура любого периодического профиля одинаково раскалывает окружающий бетон, особенно в тонкостенных конструкциях. В настоящее время разработаны расчетные модели анкеровки с различным характером разрушения, причем разрушение расколом в основном связывают с размерами защитного слоя и прочностью бетона на растяжение [4].

Эмпирической основой расчетных зависи-

мостей в СССР и России являются испытания «на выдёргивание» арматурного стержня из призмы, опёртой торцом (рис. 1-2). В последние годы чаще всего применяется схема, рекомендованная в 1983 г. международными исследовательскими организациями RILEM, FIP и CEB (рис. 1-1) [5, 6]. При испытании специальных образцов по такой схеме разрушение анкеровки происходит как путем среза контактного слоя, так и в результате раскалывания бетона вследствие развития трещин вдоль арматуры. Однако в таких образцах арматура располагается на достаточно большом расстоянии от свободных граней бетона и результаты испытаний вряд ли могут быть основанием для расчетных моделей, связанных с размерами защитного слоя. Кроме того при раннем раскалывании бетона опытная оценка прочности сцепления, если она является основной целью испытаний, не может быть достоверной. Поэтому причины раскалывания бетона и разрушения анкеровки в таких образцах требуют объяснения, необходимого для оценки надежности опытных данных и совершенствования расчетных моделей.

Так как действующими нормами проектирования допускается выполнять расчет по образованию трещин без учета неупругих деформаций, то при исследовании использованы решения задач теории упругости.

## **МОДЕЛИ АНКЕРОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Модель взаимодействия арматуры с бетоном, которая реализована при разрушении анкеровки срезом, была положена в основу технической теории сцепления, разработанной в ВНИИЖелезобетоне с рядом упрощающих допущений. Одно из допущений связано с пренебрежением напряженно-деформированным состоянием бетона в оболочке, окружающей арматуру за пределом контактного слоя, в результате чего разрушение анкеровки происходит только путем среза. Признавая этот недостаток, авторы теории сцепления допускали возможность устранения его специальными (конструктивными) методами. Они считали, в частности, что «во многом случайный характер развития продольных трещин, их опасность и трудность расчетного прогноза заставляют широко применять поперечное армирование» [2].

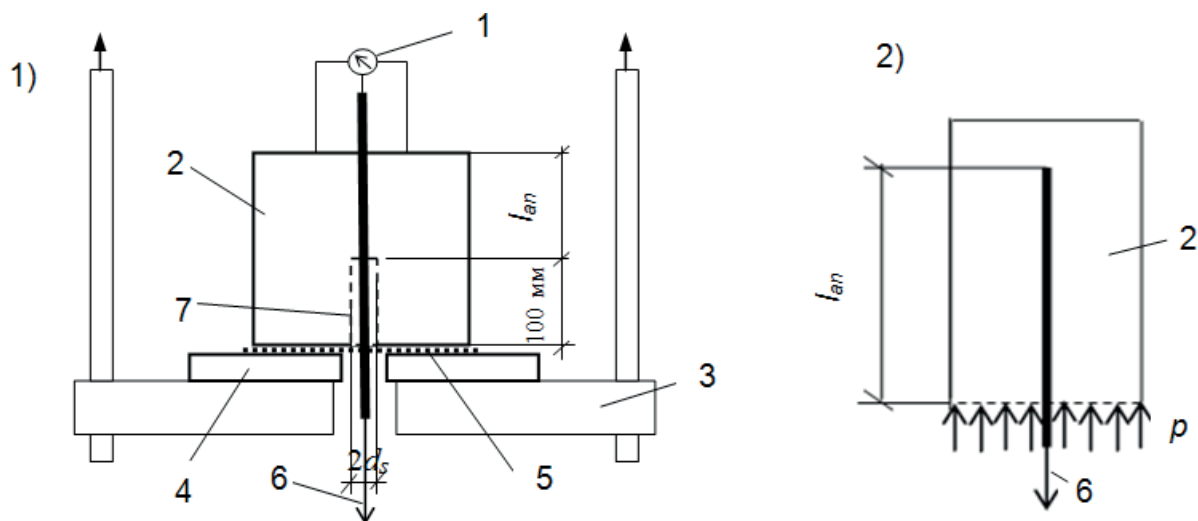


Рисунок 1 – Схемы испытания на выдергивание:  
1) по рекомендациям RILEM/CEB/FIP; 2) призма, опёртой торцом  
1 – измеритель деформаций; 2 – испытуемый образец бетона; 3 – опорная плита;  
4 – стальная пластина; 5 – резиновая прокладка; 6 – направление усилия выдергивания;  
7 – участок с нарушенным сцеплением

Эмпирической основой теории сцепления были многочисленные результаты экспериментальных исследований, выполненных, в основном, по упрощённой схеме испытания «на выдёргивание» арматурного стержня из призмы, опёртой торцом (рис. 1-2).

Однако испытания по такой схеме отвечают далеко не самому неблагоприятному случаю анкеровки, так как бетон, окружающий стержень, сжимается реактивным давлением  $p$  и улучшает условия анкеровки. Такие опыты дают завышенное сопротивление выдергиванию из-за стеснения развития трещин раскалывания и разрушение от раскалывания обычно не происходит.

Конструктивной особенностью образцов для испытания по схеме 1-1 является наличие участка с нарушенным (устраненным) сцеплением, влияние которого на напряженное состояние бетона в зоне анкеровки не может не проявляться. При испытании по этой схеме возможно разрушение как путем среза, так и в результате раскалывания бетона. Для понимания причин и условий раскалывания выполнен анализ напряженного состояния бетона в опытных образцах, испытанных по схеме 1-1.

При исследовании использован метод компьютерного моделирования и результаты испытаний, приведенные в монографии [5].

Испытания проводили в разных организациях с целью определения прочности и деформативности сцепления арматуры пе-

риодического профиля с бетоном. Всего испытывали 335 образцов с размерами  $200 \times 200 \times 200$  мм при  $l_{an} = 100$  мм, а также  $250 \times 250 \times 250$  мм и  $300 \times 300 \times 300$  мм при  $l_{an} > 100$  мм. Длину анкеровки  $l_{an}$  изменяли в пределах от  $5d_s$  до  $15d_s$ . В образцах предусматривали зону с нарушенным сцеплением длиной 100 мм. Выдергивание арматурных стержней из бетона происходило либо при срезе бетона ребрами профиля, либо при раскалывании бетонного образца. Срез наблюдался при малых величинах  $l_{an}$  или относительно низкой прочности бетона. При  $l_{an} > 8d_s$  и расчетном сопротивлении сжатию  $R_b > 17$  МПа разрушение, как правило, происходило при раскалывании бетона.

Для модели бетона образцов применены универсальные пространственные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы КЭ-36  $10 \times 10 \times 10$  мм ( $E_b = 30000$  МПа), для стальной арматуры стержневые элементы КЭ-10 ПК «Лира» длиной по 10 мм. При моделировании соблюдались все размеры опытных образцов (кроме сечения скважины на участке с нарушенным сцеплением, которое во всех случаях принято  $20 \times 20$  мм). Усилия выдергивания арматуры из бетона моделировали узловой нагрузкой  $N$  в точке с координатами  $X = Y = Z = 0$ .

Некоторые результаты моделирования приведены в работе [6].

Для получения общего представления о компьютерной модели на рис. 2 показаны ха-

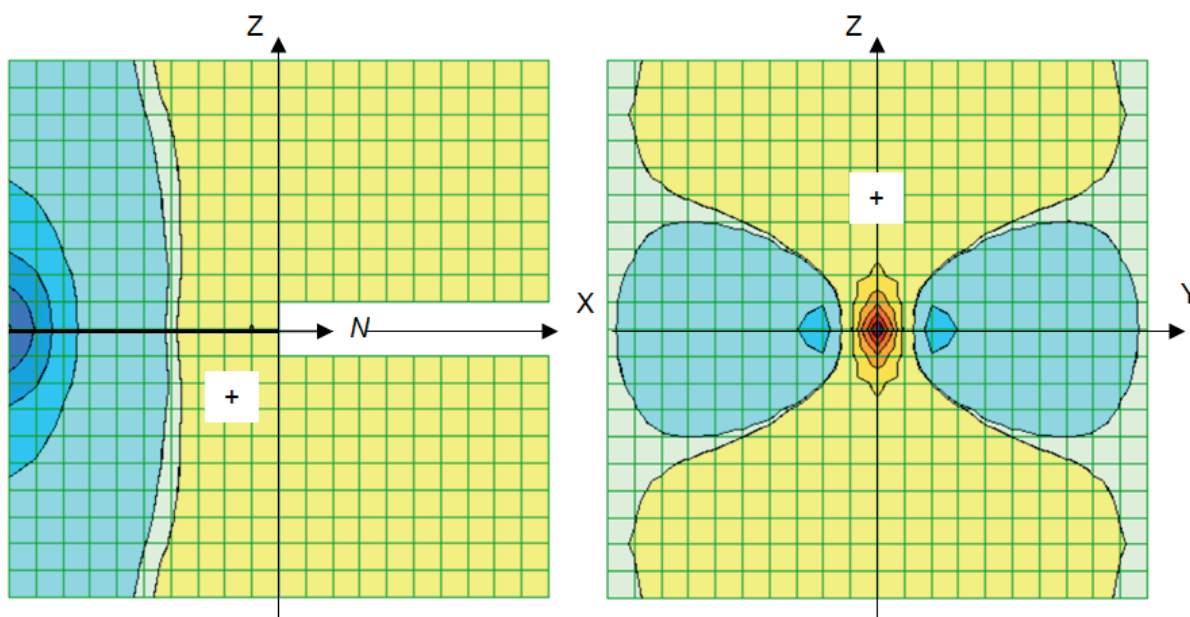


Рисунок 2 – Изополя напряжений  $\sigma_y$  в компьютерных моделях опытных образцов при выдергивании арматурного стержня усилием  $N$  (+ растяжение)

рактерные изополя раскалывающих напряжений  $\sigma_y$  в плоскостях  $XOZ$  (сечение  $Y = 0$ ) и  $YOZ$  (сечение  $X = 0$ ).

Основное внимание обращено на максимальную величину напряжений  $\sigma_y$  в массиве бетона. При обработке численных результатов принято сопротивление бетона растяжению при раскалывании  $R_{tt} = 0,1R_b$  [7]. Считается, что при условии  $\sigma_y > R_{tt}$  образуются трещины раскола и более вероятно разрушение образцов от раскола. В противном случае образцы разрушаются в результате среза бетона арматурой. Очевидно, что при равенстве  $\sigma_y = R_{tt}$  разрушение по разным схемам равновероятно.

Основные выводы из анализа напряженно-го состояния бетона опытных образцов:

- в зону вероятного раскалывания входит весь участок с нарушенным сцеплением арматуры (при отсутствии антифрикционных прокладок этот участок сокращается на 2 – 3 см) и приблизительно треть длины анкеровки;
- при смещении точки приложения усилия  $N$  вглубь анкеровки качественная картина распределения раскалывающих напряжений не изменяется;
- по мере удаления от арматуры зона раскалывания увеличивается и распространяется практически на всю ширину образцов;
- максимальные значения раскалывающих напряжений  $\sigma_y$  получены в конечных элементах, непосредственно примыкающих к точке приложения усилия  $N$ , и во всех случаях зна-

чительно превышают сопротивление бетона растяжению при раскалывании  $R_{tt}$ ;

- обнаружены элементы, назовем их критическими (на рисунке 2 во всех случаях их координаты  $X = -1,5$  см,  $Y = \pm 1,5$  см и  $Z = \pm 0,5$  см), в которых значения раскалывающих напряжений могут превышать величину  $R_{tt}$ ;
- в остальных элементах значения раскалывающих напряжений меньше  $R_{tt}$ ;
- значения напряжений в критических элементах уменьшаются с увеличением диаметра арматуры, длины анкеровки и поперечных размеров образцов, а также при смещении усилия  $N$  вглубь зоны анкеровки;

В табл. 1 приведены численные значения некоторых параметров напряженного состояния опытных образцов. При расчете характера разрушения раскалыванием установлен по условию  $\sigma_y > R_{tt}$  в критических конечных элементах.

В результате анализа напряженного состояния бетона опытных образцов установлено, что характер разрушения при моделировании в упругой стадии деформирования не совпал с опытными данными в 5 случаях из 22.

Предположено, что на результаты испытаний в отмеченных случаях могли оказать влияние неупругие деформации арматуры и образование трещин в бетоне, особенно при продолжительном нагружении образцов. Влияние неупругих деформаций учитывалось в расчете заменой сосредоточенной силы  $N$  на усилие, распределенное вдоль некоторой ча-

### РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таблица 1 – Результаты анализа напряженного состояния опытных образцов

| №  | $d_s$ , мм | N, кН | $R_{tt}$ , МПа | $\sigma_y$ , МПа |           | Характер разрушения |               |               |
|----|------------|-------|----------------|------------------|-----------|---------------------|---------------|---------------|
|    |            |       |                | МКЭ              | (1)       | опыт                | МКЭ           | (1)           |
| 1  | 2          | 3     | 4              | 5                | 6         | 7                   | 8             | 9             |
| 1  | 12         | 16,25 | 1,7            | 0,9              | 1,0       | срез                | срез          | срез          |
| 2  | 12         | 34    |                | 1,9 (1,6)        | 2,1 (1,6) | срез                | раскол (срез) | раскол (срез) |
| 3  | 14         | 32,4  |                | 1,6              | 1,7       | срез                | срез          | срез          |
| 4  | 16         | 68,3  |                | 2,7              | 3,2       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 5  | 18         | 35,5  |                | 1,3              | 1,5       | раскол              | срез          | срез          |
| 6  | 18         | 66,5  |                | 2,3              | 2,7       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 7  | 25         | 82,5  |                | 2,1              | 2,6       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 8  | 12         | 26,8  | 3,5            | 1,5              | 1,6       | срез                | срез          | срез          |
| 9  | 12         | 48,3  |                | 2,7              | 3,0       | срез                | срез          | срез          |
| 10 | 14         | 49,1  |                | 2,4              | 2,6       | срез                | срез          | срез          |
| 11 | 16         | 90,3  |                | 3,6              | 4,2       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 12 | 18         | 65,5  |                | 2,4              | 2,7       | срез                | срез          | срез          |
| 13 | 18         | 97,2  |                | 3,4              | 4,0 (3,1) | срез                | срез          | раскол (срез) |
| 14 | 25         | 145   |                | 3,8              | 4,6       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 15 | 20         | 69,8  | 2,4            | 2,4 (2,2)        | 2,6 (2,4) | срез                | срез          | раскол (срез) |
| 16 | 20         | 84    |                | 2,6              | 3,2       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 17 | 20         | 83,5  |                | 2,9 (2,3)        | 3,2 (2,2) | срез                | раскол (срез) | раскол (срез) |
| 18 | 20         | 87    |                | 2,7              | 3,3       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 19 | 25         | 101,6 |                | 2,7 (2,2)        | 3,2 (2,2) | срез                | раскол (срез) | раскол (срез) |
| 20 | 25         | 111,3 |                | 2,8              | 3,5       | раскол              | раскол        | раскол        |
| 21 | 25         | 145   |                | 3,9 (2,4)        | 4,6 (2,3) | срез                | раскол (срез) | раскол (срез) |
| 22 | 25         | 116,9 |                | 2,9              | 3,7       | раскол              | раскол        | раскол        |

сти длины анкерówki (соответствующие значения  $\sigma_y$  приведены в скобках). Так, при распределении усилия всего на 2 см длины анкерówki выполняется условие среза  $\sigma_y < R_{tt}$  в серии 2 и 15, при распределении на 3 см длины в сериях 17 и 19. В серии 21 зафиксировано максимальное значение опытного усилия, действие которого очевидно было самым продолжительным. Текучесть арматуры в этом случае должна распространиться на длине не менее 7 см при  $l_{an} = 12,5$  см. Таким образом, характер разрушения при моделировании испытаний в целом не совпал с опытным характером только в 1 случае (серия 5) из 22 (менее 5%).

Для оценки влияния арматуры разных сечений на напряженное состояние опытных образцов сравнили расчетные значения раскалывающих напряжений  $\sigma_y$  в образцах одинаковых размеров  $200 \times 200 \times 200$  мм и  $l_{an} = 100$  мм. В столбце 3 таблицы 2 приведены эти

значения в точках с координатами  $X = -1,5$  см и  $Y = \pm 1,5$  см (в скобках приведены максимальные значения напряжений для арматуры А 500). В строке 7 приведены значения напряжений  $\sigma_{oy}$  при действии силы  $N = 10$  кН в начале координат без учета влияния арматуры.

Компьютерное моделирование позволяет сравнить различные схемы испытаний и в какой-то степени оценить погрешности каждой из них. В табл. 2 приведены также расчетные значения напряжений  $\sigma_y$  при отсутствии участка с нарушенным сцеплением. При исключении таких участков из расчетных моделей образцов максимальные значения напряжений  $\sigma_y$  находятся в точках с координатами  $X = 1,5$  см и  $Y = \pm 0,5$  см. При отсутствии арматуры критические напряжения  $\sigma_{oy} = 0,38$  МПа получены при  $X = 0,5$  см и  $Y = \pm 1,5$  см.

На рис. 3 изображены характерные изополя напряжений  $\sigma_y$  в массиве бетона при от-

Таблица 2 – Значения раскалывающих напряжений  $\sigma_y$  при расчете методом КЭ

| № | $d_s$ , мм | С участками нарушенного сцепления |                              | Без участков нарушенного сцепления |                              |
|---|------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
|   |            | $\sigma_y$ , МПа                  | $k = \sigma_y / \sigma_{0y}$ | $\sigma_y$ , МПа                   | $k = \sigma_y / \sigma_{0y}$ |
| 1 | 2          | 3                                 | 4                            | 5                                  | 6                            |
| 1 | 12         | 0,57 (2,8)                        | 1,64                         | 0,50 (2,4)                         | 1,32                         |
| 2 | 14         | 0,48 (3,2)                        | 1,40                         | 0,46 (3,1)                         | 1,22                         |
| 3 | 16         | 0,43 (3,7)                        | 1,23                         | 0,43 (3,7)                         | 1,14                         |
| 4 | 18         | 0,38 (4,2)                        | 1,10                         | 0,41 (4,5)                         | 1,08                         |
| 5 | 20         | 0,35 (4,8)                        | 1,01                         | 0,39 (5,3)                         | 1,03                         |
| 6 | 25         | 0,29 (6,3)                        | 0,85                         | 0,35 (7,5)                         | 0,94                         |
| 7 | 0          | $\sigma_{0y} = 0,35$              | 1                            | $\sigma_{0y} = 0,38$               | 1                            |

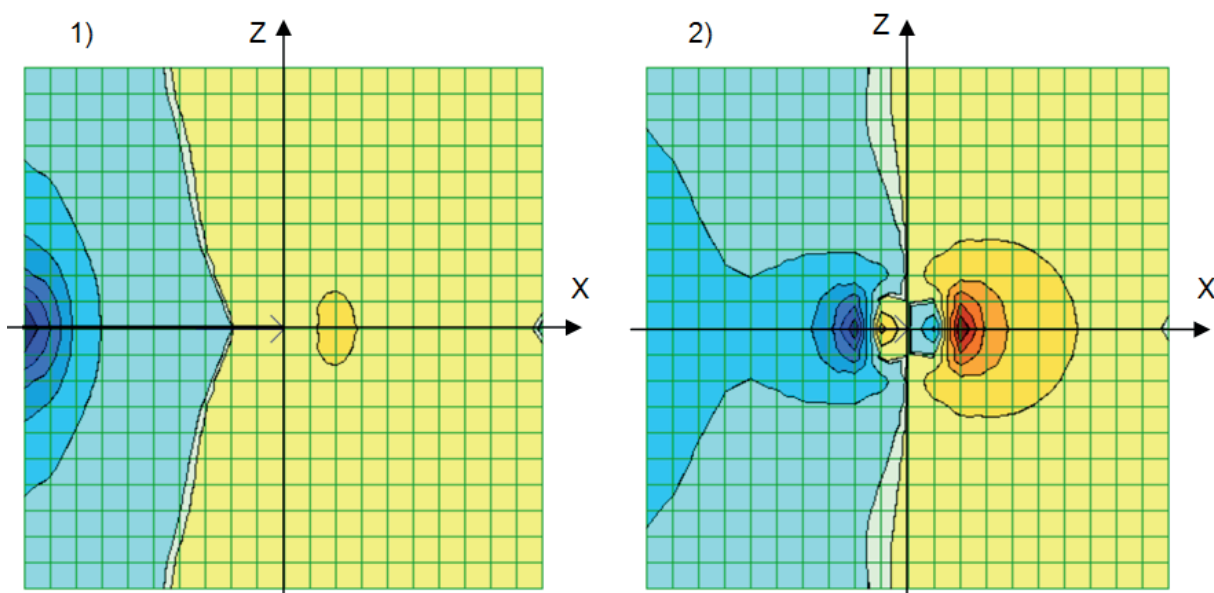


Рисунок 3 – Изополя напряжений  $\sigma_y$  в массиве бетона при действии сосредоточенного усилия в начале координат: 1) с арматурой; 2) без арматуры

существования участка с нарушенным сцеплением. Следует отметить, что при исключении конечных элементов арматуры и участка с нарушенным сцеплением (рис. 3-2) раскалывание возможно только за пределами предполагаемой зоны анкеровки.

В натуральных условиях испытательную схему без участка с нарушенным сцеплением реализовать очень сложно, хотя она, по нашему мнению, в наибольшей степени отражает действительную работу элементов при расположении арматуры в массиве бетона.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСКАЛЫВАНИЯ

Результаты расчета с использованием КЭ-моделей являются приближенными. Для

оценки степени приближения рассмотрена задача действия силы, приложенной в некоторой точке бесконечного тела, совмещенной с началом координат.

Пример приближенного решения этой задачи методом КЭ приведен на рис. 3-2. Точное решение в цилиндрических координатах при действии силы в направлении оси симметрии  $x$  получено Кельвином в виде уравнения напряжений в окружном направлении [8]. Уравнение Кельвина уточнено введением коэффициента  $k$ , учитывающего влияние арматуры и участка с нарушенным сцеплением (столбец 4 табл. 2)

$$\sigma_y = \frac{kN(1-2\nu)x}{8\pi(1-\nu)(x^2+y^2)\sqrt{x^2+y^2}}, \quad (1)$$

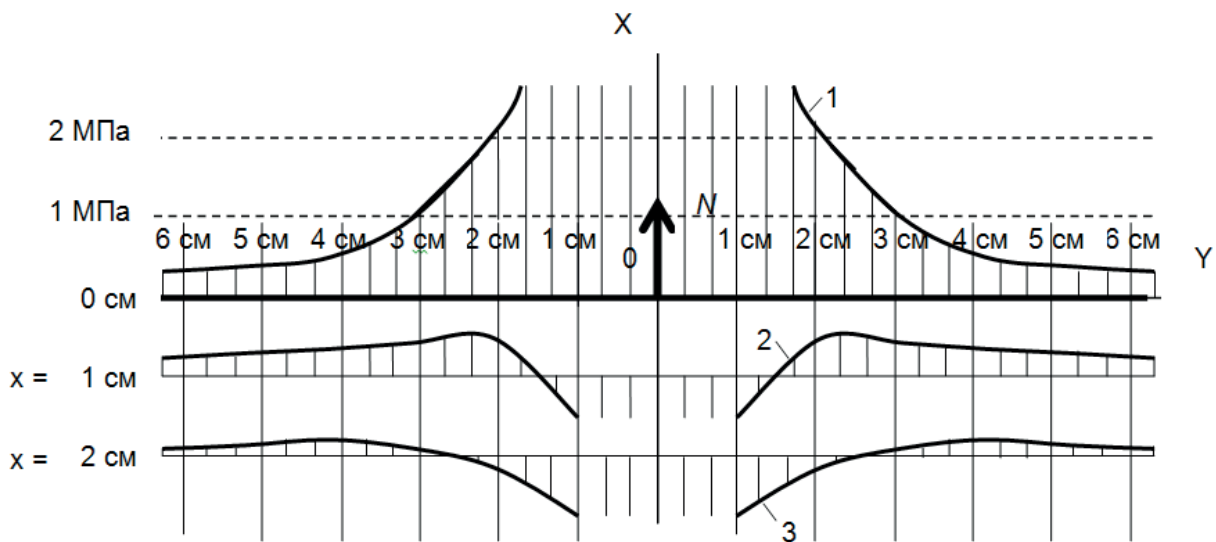


Рисунок 4 – Эпюры напряжений  $\sigma_y$  на границе полупространства – 1, на глубине 1 см – 2 и на глубине – 2 см

где  $\nu = 0,2$  – коэффициент Пуассона бетона.

Значения напряжений, определенные по формуле (1), в отдельных точках совпали с расчетными значениями метода КЭ (например, в ранее отмеченных точках с координатами  $X = 0,5$  см и  $Y = \pm 1,5$  см при  $k = 1$  получено  $\sigma_y = 0,38$  МПа).

В таблице 1 для сравнения приведены результаты расчета опытных образцов по формуле (1). Завышенные значения раскалывающих напряжений можно уточнить распределением силы  $N$  по длине анкеровки. При этом расчет сводится к решению нескольких уравнений (1) с увеличением на единицу координаты  $x$  в каждом последующем уравнении и усреднением силы  $N$ .

Например, для серии 2 (см. таблицу 1) условие среза  $\sigma_y < R_{tt}$  получено распределением силы  $N$  на 5 см при длине анкеровки 14,5 см, для серии 13 распределением силы  $N$  на 5 см при длине анкеровки 12 см, для серии 15 на 4 см при длине анкеровки 10 см, для серии 17 на 6 см при длине анкеровки 10 см, для серии 19 на 6 см при длине анкеровки 12,5 см и для серии 21 на 9 см при длине анкеровки 12,5 см.

Для исследования напряженного состояния бетона в зоне анкеровки при испытании по схеме 1-2 можно применить теоретическую модель с силой на границе полупространства. Точное решение этой задачи в цилиндрических координатах при действии силы в направлении оси симметрии  $x$  получено Буссинеском [8]. Расчетные значения напряжений в окружном направлении определяются из уравнения

$$\sigma_y = \frac{kN}{2\pi} (1-2\nu) \left[ \frac{1}{y^2} - \frac{x}{y^2 \sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{x}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2}} \right]. \quad (2)$$

При определении напряженного состояния бетона в зоне анкеровки по формуле (2), в отличие от результатов испытаний по схеме 1-1, не учитывается влияние реактивного давления  $p$ , зачастую искажающего действительную работу конструкции.

На рис. 4 показаны эпюры окружных напряжений от сосредоточенной силы  $N = 10$  кН, приложенной в начале координат и моделирующей выдергивание арматуры из бетона. Растягивающие напряжения, действующие по всей поверхности границы полупространства, могут быть причиной раскола поверхности бетона. Однако уже на небольшой глубине от поверхности (1 – 2 см) вблизи оси, по направлению которой предполагается установка арматуры, окружные напряжения меняют знак и раскол в принципе невозможен.

Моделирование системы в конечных элементах подтвердило характер раскалывающих напряжений.

Ограничения полупространства с одной или двух сторон участками, размеры которых соизмеримы с защитным слоем бетона в железобетонных конструкциях, практически не влияют на характер напряжений вблизи силы, несколько снижая их величину (рис. 5).

Известно решение задачи с силой  $N$ , загну-

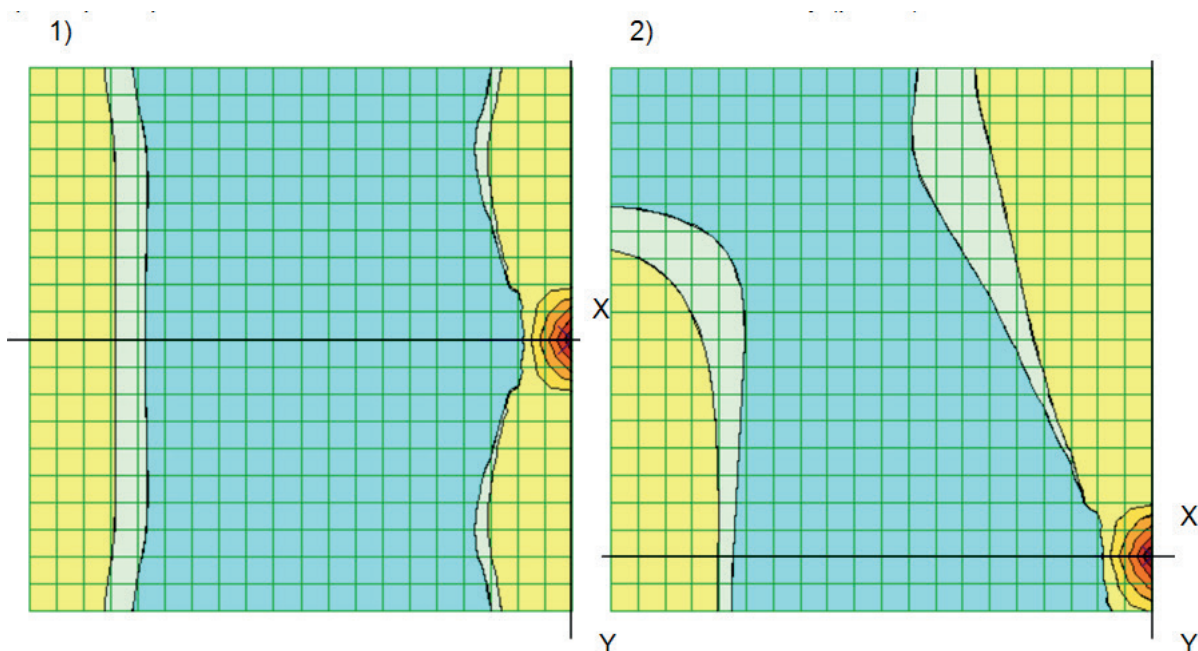


Рисунок 5 – Изополя раскалывающих напряжений в бетонном кубе 200×200×200 мм при действии сосредоточенного усилия на расстоянии от ребра: 1) 100 мм; 2) 20 мм

бленной на расстояние  $c$  от поверхности упругого полупространства. Для пространственных систем в прямоугольных координатах оно получено Р. Миндлином в виде уравнения

$$\sigma_y = -\frac{kN}{8\pi(1-\nu)} \left\{ \frac{(1-2\nu)(x-c)}{d_1^3} + \frac{(1-2\nu)[3(x-c)-4\nu(x+c)]}{d_2^3} + \frac{6c(x+c)[(1-2\nu)x-2\nu c]}{d_2^5} - \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{d_2(d_2+x+c)} \right\}, \quad (3)$$

где  $d_1 = \sqrt{(x-c)^2 + y^2}$  и  $d_2 = \sqrt{(x+c)^2 + y^2}$ .

Решение этой задачи может быть применено при анализе напряженного состояния бетона при действии силы, распределенной по длине анкеровки.

## ВЫВОДЫ

Метод компьютерного моделирования мо-

жет быть действенным средством прогнозирования характера трещинообразования и разрушения прямой анкеровки от раскалывания.

Не выявлено прямой зависимости раскалывающих напряжений от длины анкеровки. На величину раскалывающих (окружных) напряжений влияет длина участка анкеровки, на которой распределяется выдергивающая сила, или глубина смещения сосредоточенной силы в зону анкеровки.

Образование раскалывающих трещин и разрушение расколом зависит, главным образом, от прочности бетона на растяжение при раскалывании  $R_{tt}$  и степени распределения выдергивающей силы.

При испытании анкеровки по схеме 1-1 характер разрушения во многом случаен и зависит от продолжительности действия выдергивающей силы. Возможность раскола рекомендуется проверять из расчетного условия  $\sigma_y > R_{tt}$ . Раскалывающие напряжения  $\sigma_y$  определяются в критических точках с координатами  $X = -1,5$  см и  $Y = \pm 1,5$  см по формуле (1) от действия сосредоточенной силы  $N$ , приложенной в начале координат (см. рис. 2) с учетом влияния диаметра арматуры (см. табл. 2). Возможно снижение величины раскалывающих напряжений путем распределения сосредоточенной силы  $N$  методом, описанным в статье. Очевидно степень распределения силы и снижения опасности разрушения расколом за-



висит от продолжительности загрузки. Чем продолжительнее загрузка, тем больше вероятность разрушения срезом.

При проектировании величину раскалывающих напряжений на анкерровку целесообразно оценивать по схеме упругого полупространства с применением расчетных моделей (2) и (3) и учетом влияния защитного слоя толщиной  $u$ .

Представляется, что применение конструктивных методов исключения раскола (поперечное армирование) способствует благоприятному распределению выдергивающей силы.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Тихонов, И.Н. К дискуссии по статье «О нормировании анкерровки стержневой арматуры» / И.Н.Тихонов, В.З. Мешков, Г.Р. Судаков. // Бетон и железобетон. 2007. – №1. – С. 28-30.
2. Холмянский, М.М. Контакт арматуры с бетоном / М.М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184 с.
3. Скоробогатов, С.М., Эдвардс А.Д. Вли-

яние вида периодического профиля стержневой арматуры на сцепление с бетоном / С.М. Скоробогатов, А.Д. Эдвардс. // Бетон и железобетон. – 1979. – № 9. – С. 20-21.

4. Бедарев, В.В. Базовая длина анкерровки арматуры периодического профиля с учетом относительной площади смятия и характера разрушения бетона / В.В. Бедарев, Н.В. Бедарев, А.В. Бедарев. // Бетон и железобетон. – 2013. – № 1. – С. 18 – 23.

5. Мадатян, С.А. Арматура железобетонных конструкций / С.А. Мадатян. – М. : Воентехлит, 2000. – 256 с.

6. Краснощеков, Ю.В. Моделирование анкерровки арматуры в бетоне / Ю.В. Краснощеков. // Вестник СибАДИ. – 2015. – №.4. – С. 64 – 69.

7. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 30 с.

8. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.

## **CLEAVING MODELING OF CONCRETE IN THE ZONE ANCHORING FREE OF TENSION FITTING**

*Yu. V. Krasnoshchekov*

**Abstract.** *The article presents the results of computer simulation of prototypes designed to test pull-out reinforcement of concrete. Analyzes the state of stress of concrete in the anchorage zone and identifies areas likely splitting the formation of cracks in elastic deformations of the materials. The calculation results are compared with experimental data. For a theoretical justification of a possible splintering involved elasticity problem of the action of a concentrated force at the point of infinite-finite body and a half.*

**Keywords:** *reinforced concrete, the state of stress, anchoring reinforcement is-tests carried modeling, chopping, cut, elasticity theory.*

#### **REFERENCES**

1. Tikhonov I.N., Meshkov V.Z., Sudakov G.N. K discussii po statie "O normirovanii ankerovki stergnevoy armatury" [The discussion on the article "On the normalization of anchoring rod reinforcement"]. Beton i gelesobeton, 2007, no 1, pp. 28-30.
2. Kholmyanskii M.M. Kontakt armatury s betonom [Contact reinforcement with concrete]. Moscow, Sroyizdat, 1981. 184 p.
3. Skorobogatov S.M., Edwards A.D. Vlijanie vida periodicheskogo profilja na szeptlenie s betonom [Influence of the type of periodic profile, reinforcing rods adhesion]. Beton i gelesobeton, 1979, no 9, pp. 20-21.

4. Bedarev V.V., Bedarev N.V., Bedarev A.V. Basovaja dlina ankerovki armatury periodicheskogo profilja s uchetom otnositelnoi ploshchadi smjatija i charaktera rasrushenija betona [Basic anchoring reinforcement period length, the flat profile, taking into account the relative area of collapse and destruction of nature]. Beton i gelesobeton, 2013, no 1, pp. 18-23..

5. Madatyan S.A. Armatura gelesobetonnykh konstrukcij [Reinforcement of concrete structures]. Moscow, Voentechlit, 2000. 256 p.

6. Krasnoshchekov Yu.V. Modelirovanije ankerovki armatury v betone [Simulation of anchorage reinforcement in concrete]. Vestnik SibADI, 2015, No 4. pp. 64-69.

7. GOST 10180-2012. Betony. Metody opre-

delenija prochnosti po kontrolym obraszam [Concretes. Methods for determining the strength of the control samples]. Moscow, Standartinform, 2013. 30 p.

8. Timoshenko S.P., Goodier J. Teorija uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1975. 576 p.

*Краснощекоев Юрий Васильевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профес-*

*сор кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kras1942@mail.ru)*

*Yuri V. Krasnoshchekov (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of building structures, Omsk «SibADI» (644080, Mira, 5 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail: kras1942@mail.ru)*

УДК 624.154.1

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВЫПУЧИВАНИЯ ВИНТОВЫХ СВАЙ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

*В. Н. Кузнецова, М. В. Орёл  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Россия, г. Омск*

**Аннотация.** *Статья посвящена исследованию проблемы потери устойчивости винтовых свай и деформации надземных нефтегазопроводов под действием сил морозного пучения грунтов. Проанализированы характерные особенности неравномерного выпучивания свай. Выявлена и обоснована необходимость разработки методики для оценки неравномерности выпучивания свай на территориях распространения мерзлых грунтов. На основе проведенного исследования предлагаются расчетные формулы, учитывающие нагрузки на винтовую лопасть свай. Приведены результаты расчетов и графические зависимости. На основе проведенного анализа сформулированы соответствующие выводы.*

**Ключевые слова:** *винтовая свая, грунт, морозное пучение, нефтегазопровод.*

### ВВЕДЕНИЕ

Вечномерзлые или многолетнемерзлые грунты обладают рядом особенностей, которые оказывают негативное влияние на любой вид строительства, в том числе и трубопроводное. Для мерзлых, или криогенных, грунтов [1] характерно такое явление, как морозное выпучивание свайных опор нефтегазопроводов, которое происходит за счет перехода накопившейся при оттаивании в грунте влаги в лёд. Оно чаще всего проявляется в местах глубокого сезонного промерзания грунтов [2]. Главной проблемой при этом является то, что выпучивание свай на участках трубопровода происходит неравномерно, что приводит как к деформации самого трубопровода, так и к деформациям различных элементов конструкций опор (ригели, крепежные хомуты и т.д.). В последнее время при возведении газонефтепроводов в условиях Севера и Арктики стали широко применяться винтовые сваи, которые имеют следующие преимущества [3]:

1. выдерживают повышенные нагрузки;
2. винтовая лопасть повышает несущую способность свай;
3. возможен быстрый монтаж свай, а, следовательно, и высокая производительность завинчивающих и буровых машин;
4. отсутствие работ с использованием бетона, как, например, для возведения буронабивных свай;
5. создают меньшее тепловое воздействие на грунт при их завинчивании.

В связи с активным применением винтовых свай в трубопроводном строительстве появилась необходимость в разработке методики для оценки неравномерного выпучивания таких свай на мерзлых грунтах.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Механизм неравномерного выпучивания свай достаточно просто выявляется с учетом