

В. Н. РУДАКОВ, Г. А. МОЛОДЧЕНКО, Д. В. АБРАКИТОВ (Харьковская национальная академия городского хозяйства)

НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ НОРМАТИВНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА В РАМКАХ ТЕОРИИ СКОЛЬЖЕНИЯ МИКРОПОЛЯРИЗОВАННОЙ СРЕДЫ (МПС) ПРИ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ $V_{bkn_i} = (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$

У рамках теорії ковзання мікрополяризованого середовища, розробленої В. Н. Рудаковим, і норм СНиП 2.03.01-84*, норм Росії СП 52-101-2003 і норм України ДБН В. 2.6-98:2009 розглянуті співвідношення фізико-механічних характеристик важкого бетону класів В20...В60 з метою аналітичного визначення кута ковзання ϕ і міцності R_{bm} . Кубічна міцність R_{bkn} визначена за значенням B_i з нормативною довірчою ймовірністю $V_{bkn_i} = (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$. У результаті розрахунку маємо, відповідно класу бетону, кут $\phi \equiv 65...69^\circ$, а значення R_{bm} , у цілому, збіглися з нормативними для семи класів, а для класів В40 й В50 розбіжність складала, у кількісному вимірі 0,05 МПа, а в процентному близько 2 %. З огляду на змішаний характер руйнування бетону, зроблена спроба визначення опору зрізу R_{bsn} для бетону середньої міцності по формулі $R_{bsn} = R_{bm} \cdot \text{tg}\phi$. У підсумку результати наших розрахунків R_{bsn} практично збіглися з даними ранніх досліджень В. А. Бушкова, В. Я. Рутгерса і ін.

Ключові слова: бетон, фізико-механічні властивості, нанотехнології, мікрополяризоване середовище

В рамках теорії скользяния микрополяризованной среды, разработанной В. Н. Рудаковым, и норм СНиП 2.03.01-84*, норм России СП 52-101-2003 и норм Украины ДБН В.2.6-98:2009 рассмотрены соотношения физико-механических характеристик тяжелого бетона классов В20...В60 с целью аналитического определения угла скольжения ϕ и прочности R_{bm} . Кубиковая прочность R_{bkn} определена по значению B_i с нормативной доверительной вероятностью $V_{bkn_i} = (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$. В результате расчета имеем, соответственно классу бетона, угол $\phi \equiv 65...69^\circ$, а значения R_{bm} , в целом, совпали с нормативными для семи классов, а для классов В40 и В50 расхождение составило, в количественном измерении 0,05 МПа, а в процентном около 2 %. Учитывая смешанный характер разрушения бетона, сделана попытка определения сопротивления срезу R_{bsn} для бетона средней прочности по формуле $R_{bsn} = R_{bm} \cdot \text{tg}\phi$. В итоге результаты наших расчетов R_{bsn} практически совпали с данными ранних исследований В. А. Бушкова, В. Я. Рутгерса и др.

Ключевые слова: бетон, физико-механические свойства, нанотехнологии, микрополяризованная среда

Within the framework of theory of sliding of the micro-polarized environment, developed by V.N. Rudakov, norms of СНиП 2.03.01-84*, norms of Russia СП 101-2003 and norms of Ukraine ДБН В.2.6-98:2009 correlations of physical-mechanical descriptions of heavy concrete of classes В20...В60 with the purpose of analytical determination of corner of sliding ϕ and durability R_{bm} . Cube durability R_{bkn} is certain by value B_i with normative confiding probability $V_{bkn_i} = (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$. As a result of calculation have, according to the class of concrete, corner $\phi \equiv 65...69^\circ$, and value R_{bm} , on the whole, coincided with normative for seven classes, and for the classes of В40 and В50 divergence made, in the quantitative measuring 0,05 МПа, and in a percent about 2 %. Taking into account the mixed character of destruction of concrete, the attempt of determination of resistance the cut of R_{bsn} is done for the concrete of middle durability on a formula $R_{bsn} = R_{bm} \cdot \text{tg}\phi$. In the total the results of our calculations practically coincided with information of early researches of V. A. Bushkov, V. Y. Rutgers and other.

Keywords: concrete, physical-mechanical properties, nanotechnology, micropolarization environment

Современные несущие строительные конструкции должны обладать не только высокими эксплуатационными свойствами, но и должны быть рациональными по использованию прочности основных конструкционных материалов:

стали и бетона. Поэтому рациональное проектирование, в первую очередь, должно предусматривать поиск оптимальных физико-механических и геометрических характеристик несущих конструкций с целью обеспечения

минимальных материальных и трудовых затрат без снижения надёжности и долговечности конструкций [1].

По заключению авторитетных специалистов [2] будущая застройка крупнейших городов мира – за высотными зданиями, определяющими облик городской архитектуры, основным строительным материалом для которых планируется использовать, главным образом, железобетон.

В каркасах конструкционный железобетон обладает рядом преимуществ по сравнению с металлом. Так, например, теплопроводность бетона в 40 раз ниже, чем стали и, следовательно, стойкость к воздействию огня железобетонных конструкций намного выше металлических. При значительных ветровых нагрузках железобетонный каркас эффективнее рассеивает энергию колебания зданий, а более мощное сечение ядер жесткости существенно снижает уровень горизонтальных отклонений верха зданий.

Анализ разработанных методик и рекомендаций по расчёту сжатых сталежелезобетонных конструкций с нетрадиционной арматурой (например, сталежелезобетонных) позволяет сделать вывод об отсутствии современной теоретической базы для разработки методов расчёта рассматриваемых инженерных конструкций на прочность, которые наиболее полно, адекватно реальности раскрывали бы сопротивление конструкций внешним воздействиям.

И, в первую очередь, разработанные рекомендации не учитывают особенности механизма деформирования дискретных физических тел (в том числе и бетона), точное аналитическое описание которого возможно только с привлечением квантово-механических представлений [3-7].

Это, прежде всего, замена гипотетического сплошного материала реальным дискретным, представляющим собой совокупность полигонных координационных полиэдров – «искаженных» октаэдров [3, 5, 6, 8, 9]. «Искаженность» октаэдров выражена в их равномерном сжатии или растяжении вдоль главной оси симметрии 4. Для тетрагональной сингонии метрика сингонии характеризуется отношением c_n/a_n , где c_n – осевой отрезок вдоль главной оси 4, a_n – осевой отрезок вдоль нормали к плоскости симметрии [10]. Таким образом, основной структурный элемент кристаллического (поликристаллического) материала на уровне микроструктуры (наноизмерения) представляет

собой тетрагональную бипирамиду с важнейшим координационным числом «6» [3] и материальной константой

$$0 < \operatorname{tg}\phi = \frac{c_n}{a_n} < \infty, \quad (1)$$

где ϕ – угол наклона плоских граней к основанию, в дальнейшем именуемый нами углом скольжения.

В связи с тем, что плоские грани бипирамиды аккумулируют экстремальный минимум боковой поверхностной энергии (принцип Гиббса-Кюри-Вульфа) [11], то взаимодействие соседних структурных элементов в процессе их смещения под нагрузкой происходит за счёт так называемого «зернограничного» проскальзывания.

Опять-таки, опираясь на реальные факты о направленности макроскопических плоскостей скольжения кристаллического тела относительно плоскости действия осевой нагрузки (осевое сжатие или растяжение) под «материальным» углом δ , (а не под углом $\alpha = 45^\circ$) [12] и электростатическую природу химической связи [3, 4, 6], принимаем, что в процессе деформирования физического тела образуются сложные механические и электрические взаимодействия как между структурными элементами, так и внутри них.

Результатом последующего смещения электрических зарядов, следуя Максвеллу [13], образуется магнитное поле с одновременным образованием дипольных (индуцированных) моментов, совместное действие которых приводит к ротации главной оси каждого структурного элемента всей совокупности, представляющей физическое тело, из случайных направлений одинаково по направлению главного вектора внешней нагрузки (в условиях простого нагружения).

Реальность ориентационной перестройки всей совокупности структурных элементов в момент приложения нагрузки подтверждена не только существованием линий Чернова-Людерса на поверхности деформируемых тел, но и условием обеспечения минимума энергетического уровня диполей за счёт реализации эффекта ориентационной поляризации [14].

Кстати, первым учёным, установившим зависимость электрических свойств физического тела от силовых факторов, был лорд Кельвин. В 1856 г. он открыл эффект изменения проводимости металла при деформации. И только 80 лет спустя это открытие нашло практическое

применение при разработке тензорезисторов [15].

Сохраняя постоянными соотношения инвариантных тензорных характеристик НДС [12, 15, 16, 17] независимо от типа модели реального кристаллического тела (КТ), нами на основе созданной модели микрополяризованной среды (терминология Ю. Н. Работнова [18]) в рамках вариационного исчисления разработана основная физико-механическая закономерность уровня НДС КТ при осевом нагружении (простое нагружение) в условиях цилиндрического напряжённого состояния вида

$$S_1 = \frac{2\sigma_0 \operatorname{tg}\Phi}{2}, \quad (2)$$

где S_1 – наибольшее девиаторное напряжение; σ_0 – среднее (гидростатическое) напряжение; Φ – материальная (физическая) константа.

При разработке (2) объемное напряжённое состояние создавалось от осевого нагружения материала путём наложения идеальной несвободной голономной связи [19], т.е. реальное КТ помещалось в гипотетическую цилиндрическую обойму с идеально гладкими и абсолютно жесткими стенками [20].

При этом процесс квазихрупкого разрушения бетона в предельном состоянии сопровождается разделением на отдельные части, а в равновесном состоянии (стадия предразрушения) критическая нагрузка $F_{кр}$ одновременно удовлетворяет как условию нормального отрыва, так и смещения (комбинированная схема разрушения) вдоль огибающей линий скольжения [21, 15] (контура подрастающей «магистральной» трещины). Подчеркнём, что «магистральная» трещина начнёт распространяться в момент достижения равенства

$$F \equiv F_{кр}. \quad (3)$$

С учётом исходных допущений, проанализируем аналогичный процесс макроразрушения стандартных бетонных куба и призмы [22]. Экспериментально доказано, что при осевом сжатии характер разрушения куба и призмы из бетона одинакового качества идентичен.

Когда уровень сопротивления разрушению достигнет предела прочности сжатию, кубик и призма скальваются по наклонным плоскостям и их боковые части отделяются. Авторы [23-25] подобный характер разрушения обуславливают влиянием сил трения, образующихся между опорными подушками пресса и торцами образ-

цов. Так как эти силы направлены внутрь образца (рис. 1), то они препятствуют свободному развитию поперечных деформаций бетона, создавая тем самым эффект обоймы. По мере удаления от торцов образца влияние этого эффекта уменьшается до минимума. В целом, считают они, разрушение при сжатии сопровождается преодолением сопротивления отрыву по продольным (параллельным направлению главного вектора внешних поверхностных сил) трещинам, тем самым разделяя мнение О. Я. Берга [26]. В качестве дополнительного аргумента они приводят угол наклона фактической поверхности разрушения к продольной оси призмы, который намного меньше 45° .

Рассматривая структуру бетона, ряд исследователей [23, 27] относят к определяющему параметру НДС бетона, влияющему на характер его разрушения, геометрические составляющие порового пространства (форму и размер округлых полостей и остроконечных трещин) на уровне микроструктуры.

Не исключая дефектов структуры бетона подобного рода и, не преуменьшая их влияние на работоспособность инженерных конструкций, мы всё-таки отнесём их рассмотрение в раздел вероятностных методов расчёта [28], так как все реальные конструкционные материалы обладают, в той или иной степени, пористостью.

Ради корректности решения задачи необходимо обосновать возможность применения методов ЛМР для теоретической модели бетона в рамках МПС. С этой целью, в первую очередь, сошлёмся на известную работу А. М. Фрейден-таля [28], которая посвящена статистическому подходу к хрупкому разрушению. Здесь им чётко обозначена область применимости ЛМР, основанная на идеализированном представлении реального твёрдого тела в образе однородной изотропной среды преимущественно упругого поведения.

В принятой нами модели реальное кристаллическое тело представляет собой дискретное физическое тело, состоящее из совокупности однородных структурных элементов, взаимодействующих между собой в напряжённом состоянии определенным образом. В результате этого в объеме тела и на его поверхности образуются особого рода структурные «повреждения» в виде развитых полос скольжения, либо зон незаконченного скольжения на границах структурных элементов или скопления линий скольжения (оггибающих линий скольжения) на

Разрушение призмы, напротив, происходит вдоль «сквозных», идущих от торца к торцу объёмных трещин SS^* и $S_1S_1^*$, пересекающихся в центре координатной системы XYZ точке O , т. е. в «свободных» условиях.

В этом случае, толщина приповерхностного пластического слоя может быть принята нулевой, т.е. $\delta_i = 0$ и, следовательно, теперь, используя равенство (11)

$$T = T_0 + T_1, \quad (11)$$

где T_0 – удельная работа сил поверхностного натяжения [32, 33]; T_1 – удельная работа пластических деформаций; T – интегральная энергия; получим зависимости вида (6-8).

При пластическом течении результирующие напряжения R_{bz}^* и R_{bz} , соответственно для куба и призмы, могут считаться постоянными, причём с учётом (6-8, 9-10)

$$R_{bz}^* > R_{bz}. \quad (12)$$

По существующей методике их значения определяются опытным путём.

В механике разрушения важно знать и математические соотношения (условия автомодельности) между геометрическими параметрами магистральной (контурной) трещины и линейными размерами физического тела. Условия автомодельности, как известно [15], определяют степень корректности используемых силовых критериев ЛМР при переносе их с модельных (лабораторных) образцов (кубов или призм сечением $b \times b = 150 \times 150$ мм) на крупногабаритные элементы конструкций.

Для тяжёлого бетона (данного состава) определяющей инвариантной физической характеристикой, согласно модели МПС, является угол скольжения ϕ , автоматически регламентирующий эти соотношения. Однако, как показали результаты раздавливания геометрически и физически подобных призм и кубов, эти соотношения необходимо корректировать из-за несоответствия условий (6-8) условиям (9-10). Такой корректив мы предлагаем производить в рамках критерия «джей-интеграла» (J -критерия) Райса-Черепанова (не зависящего от пути интегрирования), который в преобразованном виде можно записать так:

$$J = A_k^* \cdot R_k = A_b^* \cdot R_b = G_f = \text{const}, \quad (13)$$

где A_k^* , A_b^* – поверхность разрушения на плоскости ХОУ при раздавливании соответственно

кубика и призмы (см. рис. 1); G_f – сила сопротивления продвиганию трещины [17, 34, 7].

При $A_k^* > A_b^*$; $R_k > R_b$; $A_b^* = A_{\max}$; $A_k^* = A_{\min}$;

$R_k = R_b^*$ тождество (13) примет вид

$$\frac{R_b^*}{R_b} = \frac{A_{\max}^*}{A_{\min}^*}. \quad (14)$$

Полагая

$$\frac{R_k}{R_b} = t, \quad (15)$$

$$A_{\max}^* = b^2, \quad (16)$$

$$A_{\min}^* = b^2 - (b - 2y_k)^2 = b^2 (2\text{tg}\phi - 1) / \text{tg}^2\phi, \quad (17)$$

$$y_k = \frac{b}{2\text{tg}\phi} \quad (18)$$

и преобразуя (14), получим

$$t = \text{tg}^2\phi / (2\text{tg}\phi - 1), \quad (19)$$

$$\text{tg}\phi = t + \sqrt{t \cdot (t - 1)}. \quad (20)$$

При выводе уравнений (19) и (20) в качестве эталона принята призма (рис. 1, б), для которой $R_b = \min$. Следуя стандарту [22] и используя (20), приводим данные по определению угла ϕ для тяжёлого бетона: при $t = 1,25$ $\phi \equiv 61,07^\circ$; $t = 1,3 \rightarrow \phi \equiv 62,54^\circ$; $t = 1,4$ $\phi \equiv 65,04^\circ$; $t = 1,5$ $\phi \equiv 67,09^\circ$; $t = 1,6$ $\phi \equiv 68,8^\circ$; которые практически соответствуют опытным данным [25, 35, 36].

В качестве классической апробации разработанной теории исследуем соотношения основных прочностных характеристик конструкционного бетона в рамках строительных норм бывшего Союза СНиП 2.03.01-84*, норм России СП 52-101-2003 и норм Украины ДБН В.2.6-98:2009.

Учитывая стабильность нормативных кубиковой и призмной прочности для всех классов конструкционного бетона, в рамках приведенных выше строительных норм, нами исследуется уровень осевого сопротивления растяжению R_{bm} , который, напротив, не является постоянным.

При этом аналитическая оценка фактического уровня осевого сопротивления растяжению R_{bm} производится исходя из комбинированного (смешанного) характера разрушения

центрально сжатых бетонных образцов-призм по зависимости

$$R_{btm} = 0,5R_{bn} \cos^2 \phi, \quad (21)$$

которая следует из условия равновесия проекций всех сил на нормаль \bar{n} (см. рис. 1, б), приложенных к боковым граням правильной тетрагональной пирамиды $OSS_1S_2S_3$ и к ее верхнему основанию $SS_1S_2S_3$.

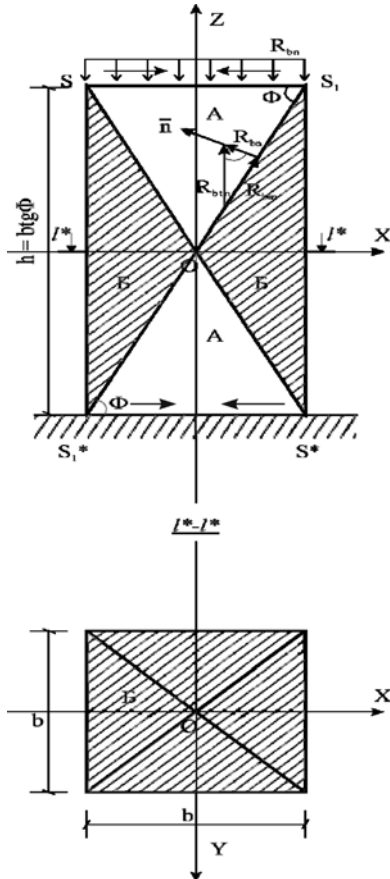


Рис. 1, б. Схема разрушения по I-типу бетонных образцов (призм) при осевом сжатии

Результаты обработки нормативных характеристик тяжёлых бетонов классов В20...В60 с использованием нормативной доверительной вероятности $V_{bkni} = (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$, где B_i – нормативный класс бетона, согласно СНиП 2.03.01-84*, СП 53-101-2003 и ДБН В.2.6-98:2009 сведены, соответственно, в табл. 1, 2 и 3.

Здесь нормативная доверительная вероятность V_{bkni} принята для оценки кубиковой прочности бетона R_{bkni} , т. е. из выражения

$$B_i = R_{bkni} (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i) \quad (22)$$

легко получим значение исходной кубиковой прочности

$$R_{bkni} = B_i / (1 - 1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i). \quad (23)$$

Так как аналитические результаты по определению нормативного сопротивления осевому растяжению R_{btm} конструкционного бетона практически совпали с нормативными, т. е. полностью совпали для 7 классов: В20, В25, В30, В35, В45, В55 и В60, а для классов В40 и В50 расхождение составило: в количественном измерении 0,05 МПа, а в процентном, соответственно, 2,38 % и 2,04 %, то можно сделать следующие выводы.

В связи с тем, что аналитические результаты по определению сопротивления осевому растяжению тяжелого бетона R_{bsn} , приведённые в табл. 1, 2 и 3, получены в рамках теории скольжения МПС, то можно сделать заключение о характере разрушения тяжелого бетона при осевом сжатии. Он может быть только смешанным (одновременно за счет отрыва и среза).

А учет такого фактора позволяет уже говорить о необходимости переработки нормативного документа ДБН В.2.6-98:2009 в связи с признанием в качестве важнейшей прочностной характеристики конструкционного бетона – сопротивления срезу R_{bsn} (8). Тем более что такие попытки предпринимались неоднократно.

Поэтому нами в рамках теории скольжения МПС приводится здесь оценка результатов ранних исследований известных специалистов Зейболда [25, 35], Мора [36], Б. Г. Скрамтаева [37] и В. Я. Рутгерса [38] по определению сопротивления срезу R_{bsn} .

В качестве исходного материала принят конструкционный бетон пяти классов: В10, В15, В20, В25 и В30, для которого по данным наших исследований среднее значение сопротивления срезу составляет: $\langle R_{bsn} \rangle = 0,19R_{bn}$, а средний угол скольжения $\langle \phi \rangle = 65,29^\circ$. Ниже приведены авторские аналитические разработки для оценки сопротивления срезу тяжелого бетона: Зейболда [25, 35]:

$$R_{bsn} = 0,75 \sqrt{R_{btm} \cdot R_{bn}}, \quad (24)$$

которая с учетом (21) легко преобразуется в вид

$$R_{bsn} = 0,75 \sqrt{0,5R_{bn} \cdot \cos^2 \phi \cdot R_{bn}} = 0,53R_{bn} \cos \phi \quad (25)$$

и Мора [36]:

$$R_{bsn} = 0,5 \sqrt{R_{btm} \cdot R_{bkni}}, \quad (26)$$

которая после подстановки значений кубиковой прочности (R_{bkn}) и прочности на осевое растяжение R_{bni} (21) примет вид:

$$R_{bsn} = 0,5\sqrt{0,5R_{bn} \cdot \cos^2 \phi \cdot 1,42R_{bn}} \equiv \equiv 0,421R_{bn} \cos \phi. \quad (27)$$

Таблица 1

Альтернативные физико-механические характеристики конструкционного бетона в рамках теории скольжения МПС В. Н. Рудакова и СНиП 2.03.01-84* по результатам осевого сжатия стандартных образцов при нормативной доверительной вероятности $V_{bkn} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$

№ п/п	Наименование характеристики	Обоснование	Классы конструкционного (тяжелого) бетона									
			B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Нормативная доверительная вероятность $V_{bkn} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$	нормы	0,9557	0,9447	0,9336	0,9225	0,9114	0,900	0,8893	0,8782	0,8672	
2	Исходная кубиковая прочность R_{bkn} , МПа	нормы	20,93	26,47	32,13	37,94	43,89	49,98	56,22	62,63	69,19	
3	Призменная прочность R_{bni} , МПа	нормы	15,0	18,5	22,0	25,5	29,0	32,0	36,0	39,5	43,0	
4	Коэффициент $f_i = R_{bkn}/R_{bni}$	авторы	1,3953	1,4308	1,4605	1,4878	1,5135	1,562	1,5617	1,5856	1,6091	
5	Угол скольжения ϕ_i , град	авторы	64,93	65,71	66,32	66,86	67,34	68,19	68,19	68,58	68,96	
6	Прочность при осевом растяжении R_{bni} (R_{bni}^*), МПа	нормы	1,40	1,60	1,80	1,95	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	
		авторы	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15	2,20	2,50	2,65	2,75	
7	Расхождение, % $[\Delta] = \frac{R_{bni} - R_{bni}^*}{R_{bni}} \times 100$	авторы	3,57	3,13	2,78	0	2,38	0	8,70	11,42	10,00	
8	Среднее расхождение $[\langle \Delta \rangle] = \frac{\sum[\Delta]}{n}, \%$	авторы	1,98						10,04			

Таблица 2

Альтернативные физико-механические характеристики конструкционного бетона в рамках теории скольжения МПС В. Н. Рудакова и норм России СП-52-101-2003 по результатам осевого сжатия стандартных образцов при нормативной доверительной вероятности $V_{bkn} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$

№ п/п	Наименование характеристики	Обоснование	Классы конструкционного (тяжелого) бетона								
			B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Нормативная доверительная вероятность $V_{bkn} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$	нормы	0,9557	0,9447	0,9336	0,9225	0,9114	0,900	0,8893	0,8782	0,8672

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	Исходная кубиковая прочность $R_{bкни}$, МПа	нормы	20,93	26,47	32,13	37,94	43,89	49,98	56,22	62,63	69,19
3	Призменная прочность $R_{bни}$, МПа	нормы	15,0	18,5	22,0	25,5	29,0	32,0	36,0	39,5	43,0
4	Коэффициент $f_i = R_{bкни}/R_{bни}$	авторы	1,3953	1,4308	1,4605	1,4878	1,5135	1,562	1,5617	1,5856	1,6091
5	Угол скольжения ϕ_i , град	авторы	64,93	65,71	66,32	66,86	67,34	68,19	68,19	68,58	68,96
6	Прочность при осевом растяжении $R_{bни} (R_{bни}^*)$, МПа	нормы	1,35	1,55	1,75	1,95	2,10	2,25	2,45	2,60	2,75
		авторы	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15	2,20	2,50	2,65	2,75
7	Расхождение, % $[\Delta] = \frac{R_{bни} - R_{bни}^*}{R_{bни}} \times 100$	авторы	0	0	0	0	2,38	2,22	2,04	1,92	0
8	Среднее расхождение $[\langle \Delta \rangle] = \frac{\Sigma[\Delta]}{n}, \%$	авторы	0,95								

Таблица 3

Альтернативные физико-механические характеристики конструкционного бетона в рамках теории скольжения МПС В. Н. Рудакова и норм Украины ДБН В.2.6-98:2009 по результатам осевого сжатия стандартных образцов при нормативной доверительной вероятности $V_{bкни} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$

№ п/п	Наименование характеристики	Обоснование	Классы конструкционного (тяжелого) бетона								
			B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Нормативная доверительная вероятность $V_{bкни} = (1-1,64 \times 0,135 \times 0,01B_i)$	нормы	0,9557	0,9447	0,9336	0,9225	0,9114	0,900	0,8893	0,8782	0,8672
2	Исходная кубиковая прочность $R_{bкни}$, МПа	нормы	20,93	26,47	32,13	37,94	43,89	49,98	56,22	62,63	69,19
3	Призменная прочность $R_{bни}$, МПа	нормы	15,0	18,5	22,0	25,5	29,0	32,0	36,0	39,5	43,0
4	Коэффициент $f_i = R_{bкни}/R_{bни}$	авторы	1,3953	1,4308	1,4605	1,4878	1,5135	1,562	1,5617	1,5856	1,6091
5	Угол скольжения ϕ_i , град	авторы	64,93	65,71	66,32	66,86	67,34	68,19	68,19	68,58	68,96
6	Прочность при осевом растяжении $f_{ctи}$, МПа	нормы	1,9	2,2	2,6	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,1
	то же, $R_{bни}^* = 0,7 f_{ctи}$, МПа	нормы	1,35	1,55	1,80	1,95	2,10	2,25	2,45	2,65	2,85

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	то же, R_{bmi}^{**} , МПа	авторы	1,35	1,55	1,75	1,95	2,15	2,20	2,50	2,65	2,75
7	Расхождение, % $[\Delta] = \frac{R_{bmi} - R_{bmi}^*}{R_{bmi}} \times 100$	авторы	0	0	2,78	0	2,38	2,22	2,04	0	3,51
8	Среднее расхождение $[<\Delta>] = \frac{\Sigma[\Delta]}{n}, \%$	авторы	1,44								

При среднем значении угла скольжения бетона $\langle \phi \rangle = 65,29^\circ$, среднее сопротивление срезу бетона $\langle R_{bsn} \rangle$, согласно формулам (25) и (27), соответственно, будет равно: $\langle R_{bsn} \rangle = 0,222R_{bn}$ и $\langle R_{bsn} \rangle = 0,176R_{bn}$.

По данным Б. Г. Скрамтаева [37] при принудительном срезе бетона по способу профессора А. А. Гвоздева, т.е. без возможности разрушения бетона вдоль плоскостей скольжения, среднее опытное сопротивление срезу составило $\langle R_{bsn} \rangle = 0,235R_{bn}$.

Здесь несколько повышенное значение R_{bsn} можно объяснить путем сравнения характера разрушения монокристалла и поликристалла, т.е. с микроструктурной точки зрения разрушение может происходить либо через внутренние области зерен, либо по границам зерен [39].

По В. Я. Рутгерсу [38] среднее сопротивление срезу для тяжелого бетона средней прочности может быть принято равным $\langle R_{bsn} \rangle = S \cdot R_{bn} = 0,17R_{bn}$. В итоге среднее статистическое значение $\langle R_{bsn}^* \rangle$ для рассматриваемых классов тяжелого бетона составило:

1. При учете результатов опытных исследований Б. Г. Скрамтаева [37]:

$\langle R_{bsn}^* \rangle = (0,222R_{bn} + 0,176R_{bn} + 0,235R_{bn} + 0,17R_{bn})/4 = 0,20R_{bn}$, а среднее расхождение между результатами наших исследований и независимых составило

$$\Delta = \frac{0,19R_{bn} - 0,20R_{bn}}{0,19R_{bn}} \times 100\% = 5,26\%.$$

2. То же, но без учета результатов опытных исследований Б. Г. Скрамтаева [37]:

$$\langle R_{bsn}^* \rangle = \frac{(0,222R_{bn} + 0,176R_{bn} + 0,17R_{bn})}{3} =$$

$= 0,19R_{bn}$, т.е. практически совпало с результатами наших исследований.

В заключение нами предлагаются две дополнительные таблицы, табл. 4, в которую включены материалы, подготовленные для ТУ и Н-39 [35] и табл. 5, в которой приведены материалы наших исследований. И в этом случае, что можно было и ожидать, аналитические соотношения по оценке сопротивления бетона срезу, приведенные в табл. 4 и 5, практически совпадают.

Таблица 4

Нормативное сопротивление срезу R_{bsn} конструкционного (тяжелого) бетона в рамках приложения к ТУ и Н 1939 г. (данные проф. В. А. Бушкова [35])

Нормативная кубиковая прочность R_{kn} , кгс/см ²	140	170	200	250	300	350
Нормативное сопротивление срезу R_{bsn} , кгс/см ²	19	22	25	29	33	38
$f_2 = R_{bsn} / R_{kn}$	0,136	0,13	0,125	0,116	0,11	0,109
$\langle f_2 \rangle = \Sigma f_2 / n$	0,726/6 = 0,121					
$R_{kn}^{\max} / R_{kn}^{\min}$	350/140 = 2,50					
f_2^{\min} / f_2^{\max}	0,109/0,136 = 0,80					

Таблица 5

**Нормативное сопротивление срезу R_{bsn}
конструкционного (тяжелого) бетона классов
В20...В45 в рамках теории скольжения МПС
В. Н. Рудакова (см. табл. 1) по результатам
осевого сжатия стандартных образцов**

«Нормативная» кубиковая прочность R_{kn}^* , МПа	21	26,5	32	38	44	50
«Нормативное» сопротивление срезу R_{bsn} , МПа	2,9	3,45	4,0	4,55	5,15	5,5
$f_2 = R_{bsn} / R_{kn}$	0,138	0,13	0,125	0,12	0,117	0,11
$\langle f_2 \rangle = \Sigma f_2 / n$	0,740/6 = 0,123					
$R_{kn}^{\max} / R_{kn}^{\min}$	50/21 = 2,38					
f_2^{\min} / f_2^{\max}	0,11/0,138 = 0,80					

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лучко, Й. Й. Методи оцінки несучої здатності і підвищення тріщиностійкості залізобетонних елементів конструкцій [Текст]. – Львів: Слово і комерція, 1997. – 435 с.
2. Ресин, В. И. Железобетон в Московском строительстве – ступень вверх [Текст]. / В. И. Ресин // Бетон и железобетон – пути развития: науч. тр. 2-ой Всеросс. (Международн.) конф. по бетону и железобетону (5-9 сентября 2005 г. Москва): в 5-ти томах. – Т. 1.: Пленарные доклады. – М.: Дипак, 2005. – С. 9-12.
3. Коттон, Ф. Основы неорганической химии [Текст] / Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон; перевод с англ. – М.: Мир, 1979. – 678 с.
4. Кузьмичев, В. Е. Законы и формулы физики [Текст] / отв. ред. В. К. Тартаковский. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.
5. Нагакура, С. Введение в квантовую химию [Текст] / С. Нагакура, Т. Накадзима; перевод с англ. – М.: Мир, 1982. – 264 с.
6. Полинг, Л. Общая химия [Текст] / Л. Полинг; перевод с англ. – М.: Мир, 1974. – 848 с.
7. Черепанов, Г. М. Механика разрушения [Текст] / Г. М. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
8. Скопенко, В. В. Координаційна хімія [Текст] / В. В. Скопенко, Л. І. Саранський. – К.: Либідь, 1997. – 336 с.
9. Шестой международный конгресс по химии цемента [Текст]: в 3 т. / под общей ред. А. С. Болдырева. – Т.1.: Химия цементного клинкера. – М.: Стройиздат, 1976. – 311 с.; Т. 2: Гидратация и твердение цемента. Кн. 2. – М.: Стройиздат, 1976. – 224 с.
10. Шаскольская, М. П. Кристаллография [Текст]: учебн. для вузов. / М. П. Шаскольская. – М.: «Высшая школа», 1976. – 391 с.
11. Костов, И. Кристаллография [Текст] / И. Костов; перевод с болг. – М.: Мир, 1965. – 528 с.
12. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел [Текст] / А. Надаи; перевод с англ. – М.: ИЛ, 1954. – 647 с.
13. Максвелл, Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме [Текст]: в 2-х т./ Дж. К. Максвелл; перевод с англ.– М.: Наука, 1989. – Т. 1. – 410 с.; Т. 2. – 436 с.
14. Уэрт, Ч. Физика твердого тела [Текст] / Ч. Уэрт, Р. Том сон; перевод с англ. – М.: Мир, 1969. – 559 с.
15. Панасюк, В. В. Основы механики разрушения [Текст]: Т. 1 / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
16. Писаренко, Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии [Текст] / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К.: Наук. думка, 1976. – 416 с.
17. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
18. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
19. Лойцянский, Л. Г. Курс теоретической механики [Текст]: в 2 т. Т. 2. Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лур'є. – М.: Наука, 1983. – 640 с.
20. Рудаков, В. Н. О механизме деформирования кристаллического (поликристаллического) квазиизотропного тела в рамках атомистического мировоззрения [Текст] / В. Н. Рудаков // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: зб. наук. праць. – Вип. 6. – Львів: Каменяр, 2005. – С. 127-139.
21. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности [Текст] / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
22. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]. – М.: Госстрой СССР.: ЦИТП, 1990. – 42 с.
23. Гольшев, А. Б. Железобетонные конструкции [Текст] / А. Б. Гольшев и др. – К.: Логос, 2001. – 420 с.
24. Гончаров, И. Г. Прочность каменных материалов в условиях различных напряженных состояний [Текст] / И. Г. Гончаров. – М. – Л.: Госстройиздат, 1960. – 124 с.
25. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона [Текст] / Я. В. Столяров. – М.-Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1941. – 448 с.
26. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона [Текст] / О. Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
27. Зайцев, Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений [Текст] / Ю. В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.

28. Фрейденталь, А. М. Статистический подход к хрупкому разрушению [Текст] / А. М. Фрейденталь // Разрушение. Ред. Г. Либовиц. Т.2. Математические основы теории разрушения: перевод с англ. – М.: Мир, 1975. – С. 616-645.
29. Крагельский, И. В. Развитие науки о трении [Текст] / И. В. Крагельский, В. С. Щедров.– М.: АН СССР, 1956. – 236 с.
30. Bowden, F. P Nature of sliding and analysis of friction [Текст] / F. P Bowden, L. Leben // Proc. Of Royal Soc, Ser A, 1939. – P. 169-371.
31. Авербах, Б. Л. Некоторые физические аспекты разрушения [Текст] /Б. Л. Авербах // Разрушение. Ред. Г. Либовиц. Т.1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения: перевод с англ. – М.: Мир, 1973. – С. 471-504.
32. Баренблатт, Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении [Текст] / Г. И. Баренблатт. – ПМТФ, 1961. – № 4. – С. 3-56.
33. Гохштейн, А. Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция [Текст] / А. Я. Гохштейн. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
34. Райс, Дж. Математические методы в механике разрушения [Текст] / Дж. Райс // Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – с. 204-335.
35. Бушков, В. А. Железобетонные конструкции [Текст] / В. А. Бушков. – Ч. 1. – М.: ГИСЛ, 1940. – 159 с.
36. Залигер, Р. Железобетон. Его расчет и проектирование [Текст] / Р. Залигер: перевод с немецк. – изд. пятое. –М.-Л.: ГНТИ, 1931. – 671 с.
37. Скрамтаев, Б. Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси [Текст]: диссертация. – М.: ЦНИИПС и ВИА РККА им. В. В. Куйбышева. – 223 с.
38. Рутгерс, В. Я. Теория прочности бетона при сжатии [Текст] / В. Я. Рутгерс. – М.-Л.: Строиздат Наркомстроя, 1939. – 79 с.
39. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел [Текст] / Т. Екобори: перевод с англ. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.

Поступила в редколлегию 28.04.2011.

Принята к печати 11.05.2011.