

Диаграммы наглядно показывают изменение величины нагрузки, соответствующей потере устойчивости откоса, в зависимости от изменения уровней факторов при взаимном их влиянии на него.

Анализ изменения  $y$  в координатах  $x_1 - x_3$  отображает тот факт, при увеличении количества армируемых слоев ( $x_3 \rightarrow \max$ ) и уменьшении длины заведения армирующего полотна за кривую скольжения ( $x_1 \rightarrow \min$ ) величина нагрузки ( $y$ ) уменьшается в 2,44 раза.

При уменьшении количества армируемых слоев ( $x_3 \rightarrow \min$ ) и вертикального шага армирования ( $x_2 \rightarrow \min$ ) величина нагрузки возрастает в 1,71 раза. Такая зависимость обусловлена тем, что количество слоев определяет высоту откоса.

Анализ изменения  $y$  в координатах  $x_1 - x_2$  показывает, что при увеличении длины заведения армирующего полотна за кривую скольжения ( $x_1 \rightarrow \max$ ) и уменьшении величины вертикального шага армирования ( $x_2 \rightarrow \min$ ) величина нагрузки ( $y$ ) увеличивается в 2,26 раза.

Анализ полученных экспериментально-статистических моделей позволил выявить зависимости величины полезной нагрузки на откос от технологических факторов: длины заведения армирующего полотна за кривую скольжения, величины вертикального шага армирования, количество армируемых слоев.

Установлена закономерность увеличения значений полезной нагрузки на откос для различных условий эксперимента при:

- увеличении длины заведения армирующего полотна за кривую скольжения от 0 до 200мм. – в 1,08–1,94 раза;
- уменьшении вертикального шага армирования от 70мм. до 50мм. – в 1,12–1,86 раза;

Максимальное увеличение показателя полезной нагрузки при оптимальных соотношениях технологических факторов возможно в 2,49 раза (по сравнению с минимальным значением).

Установленные закономерности имеют место в рассматриваемых диапазонах изменения факторов.

## ВЫВОДЫ

1. При изменении исследуемых факторов в рассматриваемых пределах, максимальная нагрузка, при которой откос сохраняет устойчивость, отличается от минимальной в 2,49 раза.

2. При проектировании армированных откосов необходимо выбирать оптимальное соотношение технологических факторов, используя для этого полученные результаты.

3. Анализ результатов исследований на экспериментальных моделях показал их новизну и эффективность, что подтверждено выдачей патента Украины [1].

4. Для принятия окончательных решений при реализации проектов по укреплению откосов необходимо проверить результаты исследований в натурных условиях.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 5187 Украина, МКИ Е 02 D 17/20. Способ возведения насыпи. / Федорук А.В.; Заявл. 22.07.04; Опубл. 15.02.05, № 2. –2с.

УДК 624.012.45.046

### О НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ РАСЧЁТА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*В.П.Митрофанов, канд.техн.наук*

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава*

**Постановка проблемы.** Иногда приходится слышать мнение о том, что уже сейчас достигнут столь высокий уровень точности моделей для расчёта бетонных и железобетонных конструкций (Б и ЖБК) и их элементов, что дальнейшее совершенствование их стало неактуальным. При этом оказывается, что высказывающие отмеченное мнение не принимают во внимание уровень развития расчётов прочности железобетонных элементов (ЖБЭ) по наклонному сечению, при совместном действии поперечного изгиба, сжатия – растяжения и кручения, а также фундаментальную проблему прочности и деформативности разнообразных конструкций и их элементов, испытывающих неоднородные (неравномерные) напряжённо-деформированные состояния (НДС). Отмеченных проблем уже достаточно, чтобы увидеть сомнительность мнения о неактуальности совершенствования расчётов Б и ЖБК и можно было бы ограничиться этим. Однако, затронутый вопрос имеет определённые истоки, которые следовало бы прояснить, поскольку отмеченное мнение, хотя в целом и дезориентирует научную общественность и особенно молодёжь, всё же имеет положительную сторону, так как напоминает о необходимости повышения научно-практической ценности исследований в названной области.

**Целью настоящей работы** является анализ причин негативного отношения к совершенствованию расчётов Б и ЖБК и обоснование с иллюстрацией примеров некоторых перспективных направлений в развитии теории расчёта их, ограничиваясь проблемой прочности при статическом кратковременном силовом воздействии и детерминированном подходе.

**Изложение основного материала.** В истории науки известны как времена подъёма и быстрого развития, так и времена упадка и застоя [1]. Эти взлёты и падения в развитии науки часто сочетались с подобными явлениями в материальной и духовной жизни людей. Поэтому негативное отношение к совершенствованию расчётов Б и ЖБК в странах СНГ, вероятно, вполне закономерно, поскольку здесь, вследствие большой ограниченности ресурсов для проведения научных исследований, приходится всё отдавать проблемам материалов и технологий, в решении которых мы катастрофически отстали от

запада, несмотря на проводимые сейчас заимствования. Но в более благополучных странах запада трудно заметить подобное настроение, если судить по работам, представленным в протоколах только что завершившегося 2-го Международного Конгресса ФИБ [2], где тематика совершенствования моделей бетона и железобетона занимала весьма значительное место. Тем не менее, на западе указанное мнение появилось даже раньше вследствие обострённого стремления их исследователей к практической результативности и частой неясности последней (как и у нас) в потоке работ по развитию расчётов Б и ЖБК. Однако, сильнее любых объективных условий жизни могут оказаться субъективные факторы, в частности, такой как способность видеть перспективы развития. Откуда же возникает такая способность? Один из ответов на поставленный вопрос прояснится, если учесть, что наука о бетоне и железобетоне всегда подпитывается идеями таких фундаментальных наук как механика твёрдого деформируемого тела (МТДТ) и математика. Здесь особенно следует подчеркнуть значение для развития теории расчёта бетона и железобетона как материалов с дуалистическими хрупко-пластическими свойствами таких разделов МТДТ как теория пластичности (ТП) и механика хрупкого разрушения (МХР), которые ещё не стали привычным аналитическим аппаратом для совершенствования решений задач расчёта Б и ЖБК.

Вторым источником перспективного развития расчётов Б и ЖБК является учёт действительных свойств бетона. Так, бетон, наряду со скальными горными породами, некоторыми грунтами и чугуном, входит в группу структурно неоднородных псевдопластических (дилатирующих) материалов, у которых формоизменение зависит от шарового тензора напряжений и вида напряжённого состояния, а объёмная деформация зависит от дивергента напряжений, что принципиально отличает бетон и горные породы от классических упругопластических конструктивных материалов. Специфика свойств бетона приводит к развитию в области разрушения бетонных элементов при неоднородных НДС участка запредельных состояний, соответствующих нисходящей ветви кривых физических зависимостей. Однако, в настоящее время преобладает недооценка роли и значения нисходящей ветви физических зависимостей бетона для предельной нагрузки элементов в условиях неоднородных НДС. Эта недооценка особенно чётко проявляется в деформационной модели прочности нормального сечения ЖБЭ при изгибе и внецентренном сжатии – растяжении, когда используется известный эмпирический критерий прочности

$$\varepsilon_{bm} = \varepsilon_{bu} \quad (1)$$

в котором  $\varepsilon_{bm}$  – фибровая деформация бетона на уровне сжатой грани ЖБЭ в нормальном сечении,  $\varepsilon_{bu}$  – предельная деформация, принимаемая из экспериментов в пределах  $(2,5 \dots 3,5) \cdot 10^{-3}$  в зависимости от класса прочности бетона.

В указанной модели распределение напряжений  $\sigma_b$  по высоте сжатой зоны бетона принимается без учёта всегда развивающегося вблизи сжатой грани ЖБЭ участка сжатой зоны в запредельных состояниях, отвечающих нисходящей ветви полной диаграммы сжатия бетона. Такое упрощение в некоторых случаях (непереармированные ЖБЭ при арматуре с физическим пределом текучести) обеспечивает вполне приемлемую точность расчётов. Но в ряде важных случаев (граница переармирования  $\xi_R$ , переармированные ЖБЭ при изгибе и внецентренном сжатии с малыми эксцентриситетами, высокопрочные бетоны и др.) упрощённая, например, прямоугольная эпюра напряжений в сжатой зоне бетона вместе с дополнительными эмпирическими зависимостями для  $\sigma_s(\xi, \dots)$  и  $\xi_R$  СНиП2.03.01–84\* приводит к давно замеченным существенным расхождениям с опытами и более точными расчётами [3,4].

Отмеченная значительная разноточность расчётов в различных задачах может быть преодолена посредством учёта влияния нисходящей ветви физических зависимостей бетона, главная роль и значение которой заключается в том, что она приводит к отображающему специфику свойств псевдопластических тел экстремальному критерию прочности (ЭКП) [5]. Этот критерий наиболее просто выражается для нормального сечения ЖБЭ

$$F(\varepsilon_{bm}) \Big|_{\varepsilon_{bm} = \varepsilon_{bu}} = \max \quad \text{или} \quad \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{bm}} \Big|_{\varepsilon_{bm} = \varepsilon_{bu}} = 0, \quad (2)$$

где  $F$  – параметр нагрузки нормального сечения как функция фибровой деформации  $\varepsilon_{bm}$  бетона. Если в деформационной модели неточное условие (1) заменить на обоснованный в [5] критерий (2), то последний вместе с физическими зависимостями для бетона и арматуры, геометрическими соотношениями, отвечающими гипотезе плоских сечений, и уравнениями равновесия позволяет получить метод расчёта прочности нормальных сечений ЖБЭ [6], в котором предельная фибровая деформация бетона  $\varepsilon_{bu}$  определяется из указанной системы уравнений как одна из неизвестных величин решаемых задач. Такой метод является полным, так как указанных уравнений МТДТ и критерия (2) достаточно для решения любых задач прочности нормальных сечений ЖБЭ без привлечения дополнительных эмпирических зависимостей. Этот метод реализован в виде универсальной программы МОК-05 и показал хорошее согласование теоретической прочности с экспериментальной при большом разнообразии условий опытных образцов.

Рассмотрим несколько примеров научной новизны и практической пользы, полученных из моделей бетонных и железобетонных элементов, уточнённых на основе использования ТП, МХР и ЭКП.

**Пример 1.** В течение десятилетий исследователи уточняли формулу для предельной поперечной силы  $Q_b$  бетона наклонного сечения ЖБЭ. Но определение  $Q_b$  на основе ТП показало [7], что единого аналитического выражения для  $Q_b$  не существует, поскольку в зависимости от соотношения  $Q_b / N_b$  ( $N_b$  – продольная сжимающая сила бетона в наклонном сечении) возможны три характерных случая разрушения бетона и три соответствующих аналитических выражения  $Q_b$ . При этом получено [8]

$$Q_b = AR_b bx + a_N N_b, \quad (3)$$

где переменные  $A$  и  $a_N$  зависят от различных аргументов и имеют различный аналитический вид для каждого случая разрушения,  $x$  – высота зоны разрушения бетона в наклонном сечении.

**Пример 2.** Согласно экспериментам [9] и формуле (3) поперечная сила  $Q_b$  оказывает существенное влияние на прочность нормальных сечений ЖБЭ, которая в одних условиях возрастает, а в других – снижается по сравнению с чистым изгибом. Такой эффект, пока не учитываемый нормами, может быть отражён посредством Оптимизационной теории прочности ЖБЭ при действии изгибающих моментов, поперечных и продольных сил (ОТПЖБЭ) [10].

**Пример 3.** Как и в нормах всех стран мира, расчёт прочности наклонных сечений в СНиП2.03.01–84\* основан на применении эмпирической формулы для  $Q_b$ . Существенные недостатки таких расчётов общеизвестны [11] и обуславливают особо острую необходимость совершенствования расчёта прочности ЖБЭ по наклонным сечениям. Сейчас надежды возлагаются на разработку деформационных моделей наклонных сечений с применением соответствующих последним физическим, деформационным и статическим зависимостям. Однако оказалось, что эти модели пока ещё далеки от практического использования и в новых нормах России расчёт на действие поперечных сил по-прежнему основан на использовании эмпирических соотношений [12]. Это же несовершенство, по-видимому, сохранится и в разрабатываемых сейчас нормах Украины. Таким образом, в нормах последующих лет сохранятся всегда существовавшие несовершенства – раздельность учёта влияния изгибающих моментов, поперечных и продольных сил, а также методологическая разобщённость расчётов прочности нормальных и наклонных сечений, которые, очевидно, должны соотноситься как частный и общий.

Недостатки нормативных и других известных методов расчёта прочности наклонных сечений преодолеваются в упомянутой выше ОТПЖБЭ [10], где более простой расчёт прочности нормальных сечений является частным случаем более общего расчёта прочности наклонных сечений. Эта теория использует условие прочности бетона у конца опасной наклонной трещины (ОНТ) (3), уравнения равновесия усилий непереармированного поперечной и продольной арматурой наклонного сечения и минимальные принципы, подобные известным принципам МТДГ [13], являющимся энергетической формулировкой условий совместности деформаций. Как видно, в ОТПЖБЭ деформационные зависимости наклонного сечения используются не в виде сложных соотношений непосредственно деформаций, а в виде минимальных

принципов, существенно упрощающих расчёт. При этом физические зависимости бетона и арматуры рассматриваются как идеально пластических тел с условием текучести (3) для бетона и условиями текучести при осевом растяжении для поперечной и продольной арматуры. ОТПЖБЭ приводит к хорошей сходимости с опытными теоретическими величинами предельной нагрузки, проекции ОНТ на ось элемента и высоты зоны разрушения бетона  $x$ . Эта теория минимизирует расход всей арматуры – поперечной и продольной, снижая расход арматурной стали в одних случаях, и повышает надёжность ЖБЭ, требуя повышенного количества арматуры по сравнению с расчётом по СНиП2.03.01–84\* – в других случаях. Таким образом, ОТПЖБЭ сочетает важные для практики достоинства: общность, физическая ясность исходных положений, точность, сравнительная простота, экономичность и надёжность рассчитанных ЖБЭ и др.

**Пример 4.** Поскольку условие прочности бетона при неосевых НДС [14] определяется двумя его характеристиками прочности – при осевом сжатии  $R_b$  и осевом растяжении  $R_{bt}$ , предельная нагрузка бетонных

элементов в указанных НДС также зависит от  $R_b$  и  $R_{bt}$ . На основании этого с целью экономии ресурсов был предложен метод одновременного определения величин  $R_b$  и  $R_{bt}$  бетона из испытаний бетонных кубиков на двустороннее смятие-раскалывание при двух значениях ширины грузопередающих пластин [15].

**Пример 5.** Известный масштабный эффект, выражающийся в снижении прочности с увеличением высоты сечения чисто бетонных балок, хорошо описывается на основе положений МХР [16] без привлечения других гипотез по данной проблеме.

**Пример 6.** Деформационная модель нормального сечения с ЭКП (2), в отличие от модели с эмпирическим критерием (1), показывает согласующееся с данными экспериментов существенное влияние на предельную фибровую деформацию  $\varepsilon_{bu}$  бетона ЖБЭ не только свойств бетона, но и количества и свойств арматуры, её предварительного напряжения, характера НДС ЖБЭ, формы их сечения и др. [4, 17].

**Пример 7.** Возможность применения ТП к расчёту прочности бетонных элементов обычно связывают с характером разрушения – хрупким (внезапным) или пластическим (постепенным). Так, чисто бетонная балка разрушается вследствие внезапного распространения трещины отрыва и ТП здесь неприменима, зато МХР оценивает прочность с достаточной точностью [16]. Однако, образец Гвоздева для испытания бетона на срез также разрушается хрупко, но в этом случае весьма точным оказывается решение ТП [18]. Поэтому внешне хрупкое разрушение не является всегда свидетельством неприменимости ТП. Применимость ТП существует, если проявляется важная сторона пластичности – возможность одновременного достижения, хотя бы в течение мгновения, условия пластичности (прочности) бетона во всей наиболее деформированной (опасной) области элемента, полностью пересекающей последний. Такая возможность достигается в образце Гвоздева и совершенно отсутствует в бетонной балке [19].

**Выводы.** Мнение о неактуальности совершенствования теории расчёта Б и ЖБК обусловлено как объективными, так и субъективными причинами. Первые – это необходимость концентрации скудных ресурсов в странах СНГ на решении острых первоочередных проблем материалов и технологий железобетонного строительства и сравнительно низкий уровень научной новизны и практической полезности исследований по совершенствованию моделей Б и ЖБК. Вторые – это недостаточно глубокий учёт реального состояния расчётов Б и ЖБК, действительных свойств бетона и перспективных направлений развития этих расчётов, связанных, например, с использованием достижений фундаментальных наук. В действительности теория Б и ЖБК полна сложных, недостаточно глубоко решённых проблем, среди которых актуальнейшей является проблема разработки модели структуры бетона, позволяющей с достаточной точностью вывести его деформативно-прочностные и другие физические свойства. В решении этой проблемы, вероятно, ещё долго будет преобладать эмпиризм, но, по нашему мнению, в будущем большую роль здесь должны сыграть модели современной математики, что уже можно заметить из полезной для исследователей бетона работы [20].

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312с.
2. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> fib Congress, June 5-8, 2006. – Naples, Italy.
3. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев, Ю.П. Гуша и др. – М.: Стройиздат, 1978. – 204с.
4. Митрофанов В.П., Шкурупий О.А., Лазарев Д.М., Митрофанов Б.П. Вплив міцності бетону та кількості арматури на граничні характеристики нормального перерізу залізобетонних елементів / Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип.12.36.наук.ст. – Рівне: НУВГП, 2005. – С.208-217.
5. Митрофанов В.П., Арцев С.И. Предельная сжимаемость бетона нормальных сечений железобетонных элементов / Проблемы теории і практики залізобетону: Зб.наук.ст. – Полтава: ПДТУ ім. Ю.Кондратюка, 1997. – С.333-337.
6. Митрофанов В.П., Практическое применение деформационной модели с экстремальным критерием прочности / Коммунальное хозяйство городов. Вип. 60. Сер. Арх-ра и техн. науки. – К.: Техніка, 2004. – С.29-48.
7. Митрофанов В.П., Прочность бетона над опасной наклонной трещиной железобетонных балок / Бетон и железобетон. – 1972. – №12. – С.37-40.
8. Mitrofanov V.P. Investigation of Destruction Zone Resistance of HSC of Beams Under Shear Forces Action. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Utilization of HS / HP Concrete. 20-24 June 1999, Sandefjord, Norway. – Proc., Vol. 1. – pp 461-468.
9. Митрофанов В.П., Воскобойник П.П. Влияние поперечной силы на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов / Бетон и железобетон. – 1982. – №9. – С.41-43.
10. Mitrofanov V.P. Optimization Strength Theory of reinforced concrete Bar elements and structures with practical aspects of its use / Byggningsstatiska Meddelelser. Danish Society for Structural Sc. And Eng. Vol. 71, No.4, Dec. 2000. – pp 73-125.

11. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. – К.: Будівельник, 1989. – 104 с.
12. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А. Настоящее и будущее расчёта железобетона / Бетон и железобетон. – 2005. – №4. – С. 3-6.
13. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
14. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
15. А.С. 1809353, МКИ<sup>4</sup> G 01 N 3 / 00. Способ определения прочностных характеристик бетона / В.П. Митрофанов, О.А. Довженко. – Оpubл. 15.04.93. Бюл. №14.
16. Митрофанов В.П., Погребной В.В., Довженко О.А. К вопросу о влиянии градиента деформаций и напряжений на диаграмму деформирования бетона / Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Сб. ст. III Международная научно-практ. конф. 23-24 ноября 2004г. – Пенза: ПГУАС, 2004. – С. 12-16.
17. Митрофанов В.П., Шкурупий А.А., Митрофанов Б.П., Лазарев Д.Н. О влиянии формы нормального сечения на предельную деформацию бетона сжатой зоны. Зб. наук. прочност. Сер. Галузеве машинобуд., буд. Вип. 15. – Полтава: ПолтНТУ, 2005. – С. 89-94.
18. Mitrofanov, V., Pogrebnoy, V., Dovzhenko, O. Paper ID3-61. – Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. fib Congress, June 5-8, 2006. – Naples, Italy.
19. Mitrofanov, V. Paper ID7-6. – Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. fib Congress, June 5-8, 2006. – Naples, Italy.
20. Кадич А., Эделен Д. Калибровочная теория дислокаций и дисклинаций. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 168 с.

#### УДК 624.012.45

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ С ОТВЕРСТИЯМИ

*Г.А.Молодченко, д.т.н., Е.И.Лугченко, асс.*

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

Здания малой этажности, работающие по жесткой конструктивной схеме, очень чувствительны к неравномерным осадкам основания. В процессе эксплуатации в их стенах, обеспечивающих жесткость здания в продольном направлении, возникают сквозные вертикальные и наклонные трещины. Появление трещин в стенах зданий приводит к изменению первоначальной расчетной схемы здания и перераспределению усилий между его конструктивными элементами. Развитие трещин обуславливает уменьшение общей жесткости здания. При этом изменяется характер работы несущих элементов (в первую очередь стен) вследствие гибкости отдельных конструкций и здания в целом, что приводит к разрушению некоторых элементов, обрушению всего здания, а в большинстве случаев – к созданию