

Строительные конструкции, здания и сооружения Structural units, buildings, structures

Научная статья

УДК 624.073.5

DOI: 10.14529/build230302

НАПРАВЛЕНИЯ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДА ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ПЛИТ

Ю.А. Ивашенко, *ivashenkoia@susu.ru*

С.А. Сонин, *soninsa@susu.ru*

Е.Н. Серебренникова, *serebrennikovaen@susu.ru*

С.А. Латышева, *honeysopha2002@mail.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Цель исследования – адаптировать метод предельного равновесия для расчета железобетонной облегченной конструкции монолитного перекрытия с использованием сборных блоков из легкого бетона. Численное исследование основано на применении моделей плиты перекрытия комбинированной конструкции и определенных теорий деформирования материалов. Результатом численного исследования является получение данных об особенностях напряженно-деформированного состояния конструкции и их сравнение при использовании различных теорий и моделей. Установлено, что расчетная схема комбинированной конструкции перекрытия, разработанная на основе применения метода конечных элементов (МКЭ), позволяет учесть нелинейные свойства бетона и железобетона, а также влияет на распределение изгибающих моментов и распорных усилий между перекрестными балками. На основе метода предельного равновесия разработаны рекомендации по определению распределения изгибающих моментов вдоль линейных пластических шарниров. Практическое значение исследования состоит в выявлении особенностей напряженно-деформированного состояния и установлении соответствия результатов расчетов экспериментальным данным.

Ключевые слова: комбинированная облегченная конструкция, влияние распора, метод предельных состояний, метод конечных элементов

Для цитирования. Направления по усовершенствованию метода предельного равновесия при расчете комбинированных железобетонных изгибаемых плит / Ю.А. Ивашенко, С.А. Сонин, Е.Н. Серебренникова, С.А. Латышева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 3. С. 14–20. DOI: 10.14529/build230302

Original article

DOI: 10.14529/build230302

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE METHOD OF LIMIT EQUILIBRIUM WHEN CALCULATING THE COMBINED STRUCTURE OF SLABS

Yu.A. Ivashenko, *ivashenkoia@susu.ru*

S.A. Sonin, *soninsa@susu.ru*

E.N. Serebrennikova, *serebrennikovaen@susu.ru*

S.A. Latysheva, *honeysopha2002@mail.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to adapt the method of limit equilibrium for the calculation of a reinforced, low-density concrete monolithic slab structure using prefabricated low-density concrete blocks. A numerical study was conducted based on the use of combined slab models and theories of material deformation. As a result, we obtained data on the stress-strain state of the structure and compared them using various theories and models. It has been established that calculating the combined slab structure using a method based on the finite element method (FEM) makes it possible

to account for the nonlinear properties of concrete and reinforced concrete, and also affects the distribution of bending moments and expansion forces between the cross beams. Based on the limit equilibrium method, recommendations have been developed for determining the distribution of bending moments along linear plastic hinges. The practical significance of the study is to identify the features of the stress-strain state and to establish the relationship between the calculation results and experimental data.

Keywords: combined slab structure, combined low-density construction, thrust effect, limit states method, finite element method

For citation. Ivashenko Yu.A., Sonin S.A., Serebrennikova E.N., Latysheva S.A. Directions for improving the method of limit equilibrium when calculating the combined structure of slabs. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2023;23(3):14–20. (in Russ.). DOI: 10.14529/build230302

Введение

В настоящее время развитие железобетонных перекрытий зданий различного назначения осуществляется в следующих направлениях:

– уменьшение массы перекрытий. Актуальность этого направления определяется тем, что собственный вес составляет 70...80 % от массы монолитного каркаса; снижение массы дает уменьшение внутренних усилий в самом перекрытии, а также в колоннах, стенах жесткости и фундаментах. Это в совокупности приводит к экономии материалов, трудоемкости и общей себестоимости [1–5];

– повышение прочности бетона с одновременным увеличением его качества;

– комбинирование бетонов разного вида в перекрытиях [6];

– комбинирование металлической арматуры с пластиковой в оптимальном соотношении с обеспечением её огнестойкости [7–9];

– совершенствование расчётных схем и методов расчёта железобетонных конструкций на основе метода предельного равновесия [10–15] и пакетов прикладных программ на ЭВМ, включая разработку вероятностных методов и методов расчета на прогрессирующее (лавинное) разрушение, необходимое по Федеральному закону № 384-ФЗ от 30.12.2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

Исследовательская часть

Появление и применение комбинированных облегченных железобетонных конструкций, дающих вполне определенный экономический эффект, потребовало разработки теоретических положений и практических методов проектирования.

Одно из направлений состояло в применении программных комплексов (ПК) для ЭВМ в упругой и неупругой постановке. Первый опыт применения комбинированной конструкции железобетонного покрытия осуществлен на основе проекта 111-07-23КЖ («Челябинскгражданпроект») совместно с кафедрой «Строительные конструкции и сооружения» (ЮУрГУ). В монолитном перекрытии 1-го этажа на угловой ячейке 4×5 м возведена конструкция, состоящая из блоков ячеистого бетона и тяжелого монолитного бетона, уложенного в

промежутках (100 мм) между блоками (толщина плиты 220 мм). Армирование – двойное металлической арматурой в соответствии со схемой по результатам расчета в ПК «ЛИРА-САПР». Не принимая во внимание сопротивление блоков из ячеистого бетона, полученная конструкция классифицируется как «кессонная».

Первоначально расчет выполнен в ПК «ЛИРА-САПР», а затем армирование скорректировано по расчету методом предельного равновесия, как для сплошной плиты. Проведено испытание фрагмента (ячейки 4×5 м) равномерно-распределенной нагрузкой, равной 1,5 от расчетной, при этом прогиб составил $1/1500$, наличие трещин не обнаружено. Небольшие прогибы при расчетных нагрузках наблюдались при испытании плит перекрытий кессонного типа [16]. Испытания фрагмента 4×5 м показали следующее:

1) расчет в упругой стадии по ПК «лира-сапр» и по традиционной схеме метода предельного равновесия существенно занижает несущую способность;

2) небольшие прогибы, наблюдаемые при испытании, могут быть обусловлены появлением арочного эффекта [17].

Использование комбинированных конструкций для перекрытий получило дополнительное развитие в исследованиях плит, работающих на изгиб в двух направлениях [18, 19]. Идея состоит в комбинации тяжелого бетона с арболитовыми блоками. Это создает имитацию кессонной конструкции с ребрами из тяжелого бетона, расположенными вдоль осей опор (в испытаниях плиты опирались по углам). Металлическая арматура располагалась по краям плит, т. е. в «осевых балках» условного кессонного перекрытия. Пластиковая арматура располагалась в промежуточных ребрах во взаимно-перпендикулярных направлениях. Теоретические исследования выполнены в виде расчетов по традиционной расчетной схеме с применением ПК «ЛИРА-САПР» и по традиционным схемам расчета метода предельного равновесия [14] с последующим сопоставлением с результатами испытаний [18, 19].

Сравнение показало, что используемые методы занижают величину несущей способности, при этом снижение данной величины по ПК «ЛИРА-САПР» существенно больше (в 2...2,5 раза). За-

нижение даёт увеличение коэффициента запаса прочности больше значений, установленных ГОСТ 8829-2018, и значительно увеличивает стоимость конструкций, снижая их конкурентоспособность.

Считаем, что комбинация тяжелого бетона, блоков легкого бетона, металлической и пластиковой арматуры является перспективным направлением при возведении монолитных каркасов. Проектирование таких каркасов требует совершенствования методов расчета. К настоящему времени разработаны алгоритмы учета нелинейных свойств бетона и железобетона на основе теорий пластичности, ползучести, анизотропии, теорий прочности сплошных и неоднородных сред. Но, несмотря на это, для практических целей проектирования в основном используются программные комплексы в упругой постановке, что снижает экономическую эффективность конструкций. Авторы предполагают, что в ближайшее время ПК в нелинейной постановке с учётом имеющихся научных данных не появятся. Поэтому возникает задача совершенствования существующих «ручных» и автоматизированных расчетов.

Считаем, что метод предельного равновесия не следует рассматривать как альтернативу использования ПК. Его необходимо использовать для контроля результатов расчета с применением ПК, а также с целью корректировки при назначении армирования.

Направлением в совершенствовании практического применения решения задач в упругой постановке является повторение расчетов с корректировкой модуля упругости бетона по СП 52-101-2003 и жесткости железобетона [18]. На первом этапе выполняется расчет при начальных значениях модуля упругости и жесткости на действие расчетных нагрузок. Затем выявляются зоны снижения модуля упругости и жесткости по следующим признакам:

- 1) напряжения в бетоне приближаются к предельным;
- 2) действующие изгибающие моменты превышают значения трещиностойкости.

Производится корректировка этих величин, и расчет повторяется. При такой схеме выполнения расчетов их результаты становятся более близкими к опытными данным.

Важными направлениями совершенствования метода предельного равновесия являются следующие:

1. *Учет истории нагружения.* Принципиально можно установить три варианта истории. Первый – нагружение осуществляется с постоянной скоростью до наступления предельного равновесия (условно – «нормальный режим»). Второй – в начале нагружения скорость небольшая в течение продолжительного времени, а затем интенсивно увеличивается до наступления предельного равновесия (условно – «мягкий режим»). Третий – с начала нагружения скорость большая в течение

продолжительного времени, а затем уменьшается до наступления предельного равновесия (условно – «жесткий режим»). При такой постановке нормальный режим является промежуточным (средним). Влияние режима предшествующего нагружения подтверждается экспериментально и теоретически [19–22] для железобетонных сжатых элементов. Влияние режима нагружения на предельное состояние изгибаемых элементов необходимо исследовать.

2. *Учет арочного эффекта.* Арочный эффект проявляется в виде распора (возникновение нормальных усилий).

Наличие распора в методе предельного равновесия можно рассмотреть, сравнивая первоначальную схему предполагаемого образования пластических шарниров со схемой, полученной после деформирования (появление прогиба). Плоские фигуры, соединяемые пластическими шарнирами (например, треугольники для плиты квадратного плана), должны изменить геометрические размеры для того, чтобы образовать пространственную фигуру. При этом возможны два варианта: первый – размеры по периметру плиты должны быть уменьшены; второй – биссектрисы (расстояние от стороны на периметре до вершины) должны быть увеличены. Из этого следует, что в плоскости треугольников должны возникать усилия (нормальные), под действием которых изменяются размеры. Это подтверждается при испытании плит с опиранием на четыре угла путем замера деформаций бетона в плоскости плиты в сжатой и растянутой зонах сечения на сторонах по периметру. В начале нагружения деформации отличались незначительно, а после появления трещин раскрытие стало существенным [18, 19].

В «Руководствах...» [14, 15] даются рекомендации для учета арочного эффекта по снижению количества арматуры на 5...20%. Такие рекомендации являются слишком общими и приближенными и не учитывают другие факторы, влияющие на появление распорных усилий.

В «Справочном пособии» [23] появление распора в монолитных плитах перекрытий объясняется появлением прогиба. Это создает дополнительный изгибающий момент, увеличивающий несущую способность (правая часть уравнения метода предельного равновесия):

$$\Delta M = R_b \cdot b \cdot x_t \cdot (h_b - x_t - f_u),$$

где x_t – увеличение высоты сжатой зоны; h_b – параметр, зависящий от толщины плиты и высоты сжатых зон на опоре $x_{оп}$ и в пролете $x_{пр}$, определяемых без учёта распора; f_u – предельный прогиб плиты.

Этот способ учитывает конструктивные особенности монолитной плиты, что даёт снижение количества арматуры на 20%. Для безбалочных перекрытий даётся рекомендация в размере 5...10%.

В книге [17] появление распора объясняется арочным эффектом, зависящим от плеча внутренней пары сил в пролетном сечении? и увеличением несущей способности на величину

$$\Delta M = H \cdot Z_f,$$

где H – усилие распора; Z_f – плечо усилия распора.

На основе выше приведённых предположений можно сформировать две модели (расчетные схемы) учета распора:

1) арочно-купольная, состоящая из сжатых зон опорных и центральных сечений (стрела подъема Z);

2) складчатая по двум вариантам: складка со стрелой подъема Z и складка с прогибом f .

Авторами предложены и реализованы схемы для определения величины распора.

Схема 1.

Межосевые балки моделировались КЭ типа «балка-стенка», а балки по осям колонн (опоры) объемными КЭ. Применялась процедура корректировки модуля упругости бетона на отдельных этапах расчета [18].

Схема 2.

Принималась схема «смежного излома» метода предельного равновесия. Задавались перемещения (прогиб) в центре или величиной 1/50, 1/100 и 1/150. Для моделирования плиты использовались КЭ типа «оболочка». По линиям излома плиты (пластические шарниры) жесткость КЭ уменьшалась в 10 раз. Расчеты показали появление нормальных усилий величиной от 0,5 до 4,0 тс в зависимости от назначенного прогиба.

3. Учет распределения предельных моментов по длине пластических шарниров (опорных и пролетных). В литературе имеются предложения в виде априорного назначения соотношений [14, 15, 17] без учёта жесткости (податливости) элементов системы перекрестных балок.

При проектировании облегчённых комбинированных конструкций перекрытий размеры и количество осевых и межосевых балок может быть разным и влиять на распределение предельных моментов по опорным и пролетным пластическим шарнирам. Учесть это обстоятельство можно по двум направлениям:

первое – ввести коэффициенты в уравнениях равновесия работ:

$$\gamma_1 A_{\text{внеш}} = \gamma_2 A_{\text{внутр}}, \text{ где } \gamma_1 < 1, \gamma_2 > 1;$$

второе – ввести дополнительные члены:

$A_{\text{внеш}} - A_1 = A_{\text{внутр}} - A_2$, где A_1 и A_2 – дополнительные члены, учитывающие влияние распора и распределение продольных моментов.

Ниже в рамках метода предельного равновесия предлагается уточнение внутренних силовых факторов путем учёта распора и перераспределения усилий по площади перекрытия (опорные и пролетные зоны).

Расчетная схема комбинированной конструкции перекрытия представляется в виде системы перекрестных балок (кессонные), образующихся после заполнения тяжелым бетоном промежутков между блоками из легкого бетона. Выделяются осевые (главные) и межосевые (второстепенные) балки. Предполагается образование пластических шарниров (зоны предельных состояний) на опорах и пролетах этих балок.

Уравнение равенства работ:

$$\left(\sum_{i=1}^m F_i \cdot y_i + \int q \cdot y_i \, dA + \int p \cdot y_i \, dl \right) \cdot \eta = \sum_{j=1}^n M_j \cdot \theta_j \dots, \quad (1)$$

где F, q, p – нагрузки; M_j – изгибающие моменты в пластических шарнирах (ПШ); θ_j – углы поворота; $\eta \leq 1$ – коэффициент, учитывающий положительное влияние распора.

Для равномерно распределённой нагрузки по площади перекрытия:

$$\eta \cdot \left(\frac{q \cdot l_y (l_x - 2c)^2}{8} \right) = \sum_{j=1}^n (M_{\text{гл}}^{\text{оп}} + M_{\text{вт}}^{\text{оп}}) + \sum_{j=1}^n (M_{\text{гл}}^{\text{пр}} + M_{\text{вт}}^{\text{пр}}) \dots \quad (2)$$

Распределение изгибающих моментов между главными и второстепенными балками определяется в зависимости:

1) от жесткости сечений главных и второстепенных балок (ребер);

2) от жесткости (податливости) заделки главных и второстепенных балок в опорных зонах; для второстепенных балок, в случае их заделки в крайние главные балки, податливость их заделки также определяется сопротивлением кручению главных балок.

По п. 1 величины моментов на опорах определяются из уравнения метода сил:

$$x_1 \cdot \left(\frac{1}{\sum B_{\text{гл}}} + \frac{1}{\sum B_{\text{вт}}} \right) + \frac{\sum M^{\text{оп}}}{\sum B_{\text{гл}}} = 0; \quad x_1 = M_{\text{вт}}^{\text{оп}}.$$

По п. 2 величины моментов на опорах определяются из системы уравнений с учетом количества второстепенных балок (ребер) и податливости от кручения главных крайних балок:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{11} \cdot x_1 + \delta_{12} \cdot x_2 + \dots + \Delta_{1n} = 0 \\ \delta_{21} \cdot x_1 + \delta_{22} \cdot x_2 + \dots + \Delta_{2n} = 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{array} \right.$$

где x_1, x_2, \dots – неизвестные опорные моменты в основной системе;

δ_{ij} – коэффициенты, зависящие от изгибной жесткости второстепенных и главных балок с учётом кручения последних, определяемые по формулам соответственно при изгибе и кручении:

$$\theta_j = \frac{M_i}{B_i} = \frac{M_i}{EJ_i/l_i};$$

$$\theta_j^{\text{кр}} = \frac{M^{\text{кр}}}{GJ_{\text{кр}}/l_y}.$$

В целях унификации армирования второстепенных балок можно их разделить на группы. Тогда система уравнений заменяется уравнением

$$\delta_{11} \cdot x_1 + \Delta_{1n} = 0,$$

где $x_1 = \sum M_{вт}^{оп} = \sum M_{оп} \frac{1}{1 + \frac{\sum B_{гл}}{\sum B_{вт}} + \frac{B_{гл}}{C_{гл}}}$,

где C – жесткость на кручение.

Предварительные расчеты определения предельных нагрузок для испытанных плит комбинированной конструкции [18, 19] показали, что учет распора и распределения моментов по линиям пластических шарниров приближает теоретические значения к опытным.

Выводы

1. Существует несколько схем учёта распора в монолитных железобетонных перекрытиях, включая облегчённые комбинированные конструкции. Учёт распора приближает теоретические значения к опытным. Необходимы дальнейшие исследования со следующими целями:

- 1) выбрать расчетные схемы, наиболее пригодные для практического применения;
- 2) для практического конструирования использовать компьютерные линейные программы

с проведением контрольных (ручных) расчетов по методу предельного равновесия;

3) определить рациональное соотношение между металлической и композитной (пластиковой) арматурой с позиции положительного влияния распора; предварительно рекомендуется главные (осевые) балки армировать металлической арматурой, а второстепенные (межосевые) – пластиковой.

2. В предельном состоянии, кроме соотношения «опорный – пролетный» изгибающие моменты для главных и второстепенных балок, необходимо учитывать соотношение «изгибающих моментов по длине» пластических опорных и пролетных шарниров.

Для системы перекрёстных балок можно рекомендовать следующие соотношения:

1) распределение между опорными и пролетными зонами:

$$M_{оп}/M_{пр} - 1 \dots 1,5;$$

2) распределение опорных и пролетных моментов вдоль пластических шарниров: зона опор/зона пролёта – 1,5...0,8.

3. Применение комбинированных монолитных конструкций перекрытий является перспективным с позиции снижения себестоимости и обеспечения надежности, а дальнейшие исследования приведут к повышению их эффективности.

Список литературы

1. Менейлюк А.Н., Остапчук А.А., Таран В.В. Облегчённые монолитные перекрытия для зданий с гибкой планировкой // Будівельне виробництво. 2012. № 53. С. 9–15.
2. Бугаевский С.А. Применение самоуплотняющегося бетона в технологии устройства облегчённых железобетонных перекрытий // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2015. №69. С. 79–90.
3. Бугаевский С.А. Современные облегченные железобетонные перекрытия с применением не извлекаемых вкладышей пустотообразователей // Науковий вісник будівництва. 2015. №3. С.73–87.
4. Аралов Р.С., Римшин В.И. Анализ использования облегчённых конструкций монолитных плит в российской и зарубежной практике // Проблемы науки. 2017. №7(20). С. 24–29.
5. А.с. 1738962 СССР, Е 04 С 2/26, Е 04 В 5/02. Железобетонный ограждающий элемент / В.С. Шмуклер, В.Д. Бедим, И.В. Шмуклер, Д.В. Бедим. № 4865059/33; заявл. 10.09.90; опубл. 07.06.92, Бюл. № 21.
6. Ивашенко Ю.А., Шарифов А.Х., Рахмонзода А.Дж. Анализ результатов исследований облегченных плит с комбинированным армированием // Материалы научно-практической конференции «Технические науки и инженерное образование для устойчивого развития». Часть 2. Таджикистан, Душанбе, 2021.
7. Гуровая Л.А. Экспериментальные исследования опертых по контуру бетонных плит со стальным и внешним стеклопластиковым армированием: дис. ... канд. техн. наук. Киев, КИСИ, 1982.
8. An experimental study on the long-term behavior of CFRP pultruded laminates suitable to concrete structures rehabilitation / F. Ascone, V.P. Berardi, L. Feo, A. Giordano // Composites Part B: Engineering. 2008. No. 39 (7–8). p. 1147–50. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.03.008
9. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимер-композитной арматурой // Известия КГАСУ. 2014. №3 (29). С. 7–13.
10. Ефрюшин С.В., Викулов М.А. Предельное равновесие жесткопластических сетчатых плит // Строительная механика и конструкции. 2012. № 1(4). С. 8–31.
11. Викулов М.А. Развитие метода предельного равновесия для перекрёстных стержневых систем из жестко-пластичного материала: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГАСУ, 2013. 20 с.
12. Викулов М.А., Ефрюшин С.В. Метод построения области предельной несущей способности идеально пластических композитных сечений стержней при сложном напряженном состоянии // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 3 (31). С. 76–83.
13. Ахвледiani Н.В., Ахвледiani А.Н. Статический классический и сингулярный предельный анализ идеально жестко-пластичных систем в условиях не вполне достоверной информации о внешней нагрузке. Тбилиси: Карамизль, 2010. 99 с.

14. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с безбалочными перекрытиями / НИИЖБ, ЦНИИ промзданий, УралПромстрой НИИ проект. М.: Стройиздат, 1979. 62 с.
15. Руководство по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций / НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1975. 192 с.
16. Грановский А.В., Чупанов М.Д. Экспериментальные исследования несущей способности плит перекрытий кессонного типа // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №5. С. 43–48.
17. Бондаренко В.М., Суворкин Д.Г. Железобетонные и каменные конструкции: учебн. для студент вузов по спец. «ПГС». М.: Высш. шк., 1987. 384 с.
18. Ivashenko Yu.A., Sonin S.A. A numerical study of the performance of a combined floor panel // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». 2022. Т. 22, № 4. С. 5–14. DOI: 10.14529/build220401.
19. Ивашенко Ю.А., Шарифов А.Х. Результаты экспериментальных исследований облегченных монолитных плит перекрытий с комбинированным армированием // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2020. Т. 20, № 3. С. 14–21. DOI: 10.14529/build200302
20. Шарифов А.Х., Ивашенко Ю.А., Рахмонзода А.Дж. Экспериментальные исследования прочности, жесткости и трещиностойкости облегченных плит с комбинированным армированием // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2021, Т. 21, № 4. С. 5–15. DOI: 10.14529/build210401
21. Щелкунов В.Г. Резервы прочности сжатых железобетонных элементов // Бетон и железобетон. 1980. № 1. С. 8–11.
22. Лобанов А.Д. Расчет центрально-сжатого железобетонного элемента с учётом режима внешнего нагружения // Совершенствование железобетонных конструкций для промышленного и гражданского строительства и технология их изготовления на Среднем Урале: тезисы докл. обл. науч.-техн. конф. Свердловск: Уральский Промстрой НИИ проект, 1987. С. 11–12.
23. Проектирование железобетонных конструкций: справочное пособие / А.Б. Голышев, В.Я. Бачинский, В.П. Полищук и др.; под ред. А.Б. Голышева. 2-е изд. перераб и доп. Киев: Будівельник, 1990. 544 с.

References

1. Menevlyuk A.I., Ostapchuk A.A., Taran V.V. [Lightweight Monolithic Slabs for Buildings with “Flexible Planning”]. *Budivel'ne virobništvo* [Construction Production]. 2012;53:9–15. (in Russ.)
2. Bugayevskiy S.A. [The Use of Self-Compacting Concrete in the Technology of Construction of Lightweight Reinforced Concrete Floors.]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnoho universiteta* [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University]. 2015;69:79–90 (in Russ.)
3. Bugayevskiy S.A. [Modern Lightweight Reinforced Concrete Floors with the Use of Non-Removable Hollow Core Inserts]. *Naukoviy visnik budivnitsva* [Scientific Bulletin of Construction]. 2015;3:73–87. (in Russ.)
4. Aralov R.S., Rimshin V.I. [Analysis of the Use of Lightweight Structures of Monolithic Slabs in Russian and Foreign Practice]. *Problemy nauki* [Problems of Science]. 2017;7(20):24–29. (in Russ.)
5. Shmukler V.S., Bedim V.D., Shmukler I.V., Bedim D.V. *Zhelezobetonnyy ograzhdayushchiy element* [Reinforced Concrete Enclosing Element]. Patent USSR, no. 1738962, 1992. (in Russ.)
6. Ivashenko Yu.A., Sharifov A.H., Rahmonzoda A.Dzh. [Analysis of the Results of Studies of Lightweight Slabs with Combined Reinforcement]. In: *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii “Tekhnicheskie nauki i inzhenernoe obrazovanie dlya ustojchivogo razvitiya”*. Chast' 2. [Pros. of the Scientific-practical Conference “Technical Sciences and Engineering Education for Sustainable Development”. Part 2], Tajikistan, Dushanbe; 2021. (in Russ.)
7. Gurovaya L.A. *Eksperimental'nye issledovaniya opertyh po konturu betonnyh plit so stal'nym i vneshnim stekloplastikovym armirovaniem: dis. kand. tekhn. nauk.* [Experimental Studies of Contour-supported Concrete Slabs with Steel and External Fiberglass Reinforcement. Cand. sci. diss.]. Kyiv: KISI, 1982.
8. Ascione F., Berardi V.P., Feo L., Giordano A. An Experimental Study on the Long-term Behavior of CFRP Pultruded Laminates Suitable to Concrete Structures Rehabilitation. *Composites Part B: Engineering*. 2008;39(7–8):1147–1150. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.03.008
9. Antakov A.B., Antakov I.A. Experimental studies of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2014;3(29):7–13. (in Russ.)
10. Efyushin S.V., Vikulov M.A. Limiting balance of rigid mesh plates. *Structural Mechanics and Structures*. 2012;1(4):7–30. (in Russ.)
11. Vikulov M.A. *Razvitie metoda predel'nogo ravnovesiya dlya perekrestnykh sterzhnevyykh sistem iz zhestko-plastichnogo materiala: Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk.* [Development of the Limiting Composition Method for Cross-rod Systems Made of Rigid-plastic Material. Abstract of cand. sci. diss.] Voronezh: VGASU; 2013. 20 p. (in Russ.)
12. Vikulov M.A., Efyushin S.V. Method of construction of the limit bearing capacity of ideally plastic composite sections of rods in a complex stress state. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2013;3 (31):76–83. (in Russ.)

13. Ahvlediani N.V., Ahvlediani A.N. *Sticheskiy klassicheskiy i singulyarnyy predel'nyy analiz ideal'no zhestko-plastichnykh sistem v usloviyakh ne vpolne dostovernoy informatsii o vneshnej nagruzke* [Static Classical and Singular Limit Analysis of Ideally Rigid-plastic Systems under Conditions of not quite Reliable Information about the External Load]. Tbilisi: Karamiel Publ.; 2010. p. 99. (in Russ.)
14. *Rukovodstvo po proektirovaniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy s bezbalochnymi perekrytiyami* [Guidelines for the Design of Reinforced Concrete Structures with Flat Slabs]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1979. p. 62. (in Russ.)
15. *Rukovodstvo po raschetu staticheski neopredelimyykh zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Guidelines for the Design of Statically Indeterminate Reinforced Concrete Structures]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1975. p. 192. (in Russ.)
16. Granovsky A.V., Chupanov M.R. Experimental studies of bearing capacity of floor slabs of caisson type. *Industrial and Civil Engineering*. 2015;5:43–48. (in Russ.)
17. Bondarenko V.M., Suvorkin D.G. *Zhelezobetonnye i kamennyye konstruktsii: uchebnyy dlya studentov vuzov po special'nosti "PGS"* [Reinforced Concrete and Stone Structures: a Textbook for University Students in the Specialty "Industrial and Civil Construction"]. Moscow: Graduate School Publ.; 1987. P. 384. (in Russ.)
18. Ivashenko Yu.A., Sonin S.A. A numerical study of the performance of a combined floor panel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022;22(4):5–14. DOI: 10.14529/build220401
19. Ivashenko Yu.A., Sharifov A.Kh. Results of Experimental Research for Lightweight Monolithic Floor Slabs with Combined Reinforcement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2020;20(3):14–21. (in Russ.). DOI: 10.14529/build200302.
20. Sharifov A.Kh., Ivashenko Yu.A., Rakhmonzoda A.Dzh. Experimental Studies of Strength, Rigidity and Cracking Resistance of Lightweight Slabs with Combined Reinforcement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021;21(4):5–15. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210401.
21. Shchelkunov V.G. [Strength Reserves of Compressed Reinforced Concrete Elements]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1980;1:8–11. (in Russ.)
22. Lobanov A.D. [Calculation of a centrally compressed reinforced concrete element taking into account the external loading mode]. In: *Sovershenstvovanie zhelezobetonnykh konstruksiy dlya promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva i tekhnologiya ikh izgotovleniya na Srednem Urale: tezisy dokl. obl. nauch-tekhn. konf.* [Improvement of reinforced concrete structures for industrial and civil construction and the technology of their manufacture in the Middle Urals: abstracts of reports of the regional scientific and technical conference]. Sverdlovsk: Ural'skiy Promstroy NII proekt"; 1987. pp. 11–12. (in Russ.)
23. Golyshev A.B., Bachinskiy V.Ya., Polishchuk V.P., Harchenko A.V., Rudenko I.V. *Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy: spravochnoe posobie* [Design of Reinforced Concrete Structures: a reference guide]. Kyiv: Budivel'nik; 1990. p. 544. (in Russ.)

Информация об авторах:

Ивашенко Юлий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ivashenkoia@susu.ru

Сонин Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; soninsa@susu.ru

Серебrennikova Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; serebrennikovaen@susu.ru

Латышева Софья Александровна, студент кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; honeysopha2002@mail.ru

Information about the authors:

Yuliy A. Ivashenko, Doc. Sci. in Engineering, professor, Department of Building Structures and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ivashenkoia@susu.ru

Sergey A. Sonin, Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor, Department of Building Structures and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; soninsa@susu.ru

Elena N. Serebrennikova, Senior lecturer, Department of Building Structures and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; serebrennikovaen@susu.ru

Sofiya A. Latysheva, Student, Department of Building Structure and Facilities, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; honeysopha2002@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 27.04.2023; approved after reviewing 10.05.2023.