

УДК 691.328.4

© К. А. Фабричная, канд. техн. наук
(Казанский государственный архитектурно-
строительный университет, Казань, Россия)
E-mail: fabrichnaya@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-31-42

© К. А. Fabrichnaya, PhD in Sci. Tech.
(Kazan State University of Architecture
and Engineering, Kazan, Russia)
E-mail: fabrichnaya@list.ru

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ИЗ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ

STRENGTH ASSESSMENT OF COMPLEX INTERSECTIONS MADE OF EXPANDED CLAY CONCRETE BLOCKS

Приводятся результаты расчетов предложенной автором конструкции комплексных перемычек, состоящих из керамзитобетонной оболочки и армированного бетонного сердечника. Для оценки несущей способности сечения выполнены численное моделирование напряженно-деформированного состояния трех вариантов конструктивного решения, расчет комплексного сечения, сопоставление результатов расчета и моделирования. Установлено влияние вида арматуры и бетона сердечника на величины разрушающих и трещинообразующих нагрузок, распределение напряжений в поперечном сечении и по длине элемента, развитие прогибов.

Ключевые слова: армокаменные конструкции, комплексное сечение, керамзитобетон, композитная полимерная арматура.

The article presents the results of calculations for the design of proposed by the author complex intersections which are made of expanded clay concrete shell and a reinforced concrete core. To assess the load-bearing capacity of the section, there was performed a numerical modeling of the stress-strain state of three variants of the design, solution calculation of a complex section, comparison of calculation and simulation results. There has been established influence of the reinforcement type and concrete core on the magnitude of destructive and crack-forming loads, the distribution of stresses in the cross section and along the length of the element, and the development of deflections.

Keywords: reinforced masonry structures, complex section, expanded clay concrete, composite polymer reinforcement.

Введение

Кладка из керамзитобетонных блоков широко распространена в жилищном строительстве как для несущих стеновых элементов малоэтажной застройки, так и в качестве заполнения железобетонных каркасов многоэтажных зданий — внутренних слоев ограждающих конструкций и перегородок [1]. Особенностью конструкций из керамзитобетонных блоков являются их повышенные по сравнению с кладкой из полнотелых кирпичей теплотехнические характеристики, габариты, отличные по высоте, что необходимо учитывать при устройстве проемов и проектировании перемычек. С аналогичной проблемой устройства пере-

мычек сталкиваются при применении газобетонных блоков и крупноформатных керамических камней. Использование брусковых железобетонных перемычек и стальных профилей снижает теплоэффективность ограждающей конструкции из-за термической неоднородности материалов, размеры сборных железобетонных перемычек могут не совпадать по размеру с блоками. Альтернативами стали сплошные армированные перемычки из материала блоков — газобетона [2], керамзитобетона или комплексные сечения, в которых материал стеновых блоков служит несъемной опалубкой для армированного стальной арматурой бетонного сердечника, П-образные блоки из поризо-

ванной керамики, газобетона, керамзитобетона.

Сплошные брусковые перемычки из керамзитобетона выпускаются заводами ЖБИ в тех же опалубках, что и железобетонные, с армированием каркасами из стальной стержневой арматуры для расчетной нагрузки 980 кг/м^2 . Ширина и высота этих перемычек ограничивают их использование в кладке из пустотелых и сплошных керамзитобетонных блоков толщиной 160 и 190 мм при высоте блока 188 мм. Также в конструкции перемычки не предусмотрена замена стальной арматуры на композитную. Исследования сплошных и комплексных сечений керамзитобетонных изгибаемых элементов, проведенные в НИИЖБ [3], установили, что большинство балок разрушались до достижения расчетного разрушающего момента из-за преждевременного нарушения сцепления арматуры с бетоном, а прочностные свойства арматуры в керамзитобетоне классов В3.5-В10 были недоиспользованы. Ю. И. Мешкаускас изготовил и испытал двухслойные и трехслойные балки из тяжелого бетона и керамзитобетона с процентом армирования от 0,5 до 1,55, по результатам испытаний которых сделан вывод о том, что расчет прочности, «если нейтральная ось проходит в пределах более прочного бетона, расположенного в сжатой зоне элемента, может производиться так же, как у прямоугольного сечения, прочность которого соответствует прочности сжатого верхнего слоя». Однако стоит отметить, что форма рассмотренных в [3] комплексных сечений простая — слоистая.

Применение композитной арматуры в различных видах изгибаемых железобетонных конструкций изучено многочисленными отечественными [4–6] и зарубежными авторами [7–9], однако они отмечают ряд вопросов, которые остаются открытыми в нормативных методиках в части расчетов по образованию, раскрытию трещин [10] и прогибам [11–14], в частности учет сцепления

композитной арматуры с бетоном. В экспериментальных исследованиях, выполненных под руководством В. Г. Хозина [15], отмечается, что сцепление арматуры с бетоном зависит от типа поверхности АСК (арматуры стеклокомпозитной), а лучшие результаты при испытаниях балок получены при использовании большого количества стержней малого диаметра.

Применение композитной арматуры для керамзитобетонных конструкций исследовано для сжатых элементов — стен и столбов — в виде сеток армирования в растворных швах [16] и в качестве гибких связей для многослойных стен. Для изгибаемых элементов исследования не проводились. Использование композитной арматуры для газобетонных конструкций исследовано для разных видов и диаметров АСК [17]. При армировании стержнями 5, 8 и 12 мм максимальная несущая способность установлена при использовании арматуры 8 мм, отмечено, что автоклавная обработка изделий повысила качество сцепления газобетона с арматурой АСК.

Учитывая вышеизложенное, предложены конструкции комплексных перемычек для кладки ограждающих конструкций и межквартирных перегородок из пустотелых керамзитобетонных блоков, получен патент на полезную модель [18]. Перемычка представляет собой оболочки из четырехщелевого керамзитобетонного блока, в полости которых в растянутой зоне через удаленные стенки установлена рабочая арматура, соединенные сердечником из бетона (рис. 1). Характеристики, принятые для комплексных сечений перемычек, приведены в табл. 1.

Предложенное расположение арматуры, защищенной оболочкой и сердечником (защитный слой бетона сердечника не менее 25 мм), позволяет снизить для АСК негативное влияние возможного повышения температуры, приводящее к уменьшению несущей способности и увеличению деформативности элементов.

Таблица 1

Основные характеристики комплексных сечений перемычек

Элемент сечения	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Оболочка	Керамзитобетонный блок 190×190×390, В3.5, D1000 $R_{b,n} = 2,7$ МПа, $R_{bt,n} = 0,39$ МПа, $E_b = 5500$ МПа		
Арматура	A500 2d8 $R_{s,n} = 500$ МПа $E_s = 200\,000$ МПа	АСК 2d8 $R_{fn} = 560$ МПа $E_f = 55\,000$ МПа	
Сердечник	Тяжелый бетон В15 100×160(h) $R_{b,n} = 11$ МПа, $R_{bt,n} = 1,1$ МПа, $E_b = 24\,000$ МПа	Тяжелый бетон В15 100×160(h) $R_{b,n} = 11$ МПа, $R_{bt,n} = 1,1$ МПа, $E_b = 24\,000$ МПа	Легкий бетон В15 100×160(h) D1200 $R_{b,n} = 11$ МПа, $R_{bt,n} = 1,1$ МПа, $E_b = 10\,500$ МПа

Методы

Расчет предложенного комплексного сечения выполняется на основании методик, приведенных в СП 427.1325800.2018, СП 63.13330.2018, СП 15.13330.2020

и СП 295.1325800.2017 (далее соответственно СП 427, СП 63, СП 15 и СП 295).

Для оценки прочности использовалась методика СП 427.1325800.2018 для элемента с одиночной гибкой арматурой, с уточнением

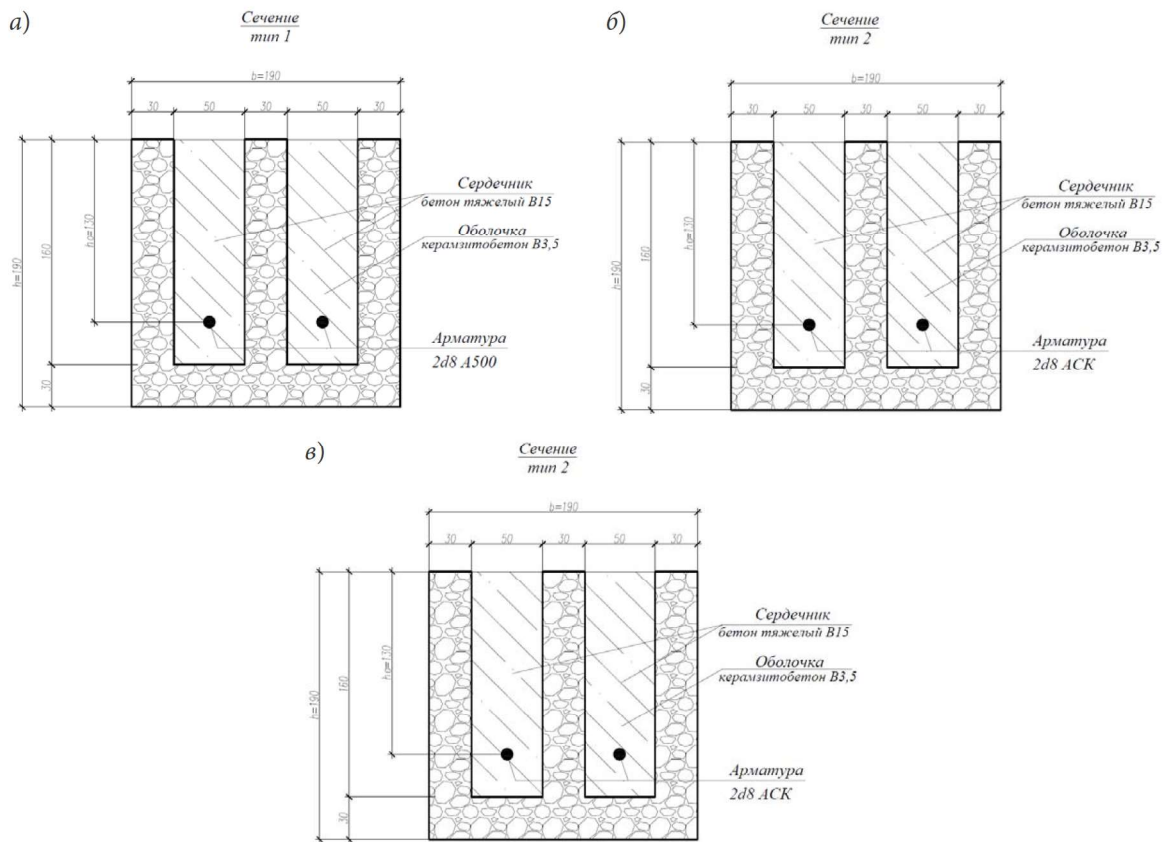


Рис. 1. Характеристики принятых трех типов комплексных сечений: а — типа 1; б — типа 2; в — типа 3

при применении композитной арматуры. Прочность нормального сечения определялась из условия

$$M \leq R S_{cs} + R_b S_{bc}, \quad (1)$$

где R и R_b — сопротивление сжатию для материала оболочки и сердечника соответственно; S_{cs} , S_{bc} — статические моменты площадей сжатой части сечения оболочки и бетона сердечника относительно центра тяжести арматуры A_s .

Положение нейтральной оси определяется из уравнения:

$$R_s A_s = R A_{cs} + R_b A_{bc}, \quad (2)$$

где A_s , A_{cs} и A_{bc} — площади арматуры, оболочки и сердечника соответственно; R_s — сопротивление растяжению арматуры, для АСК необходимо учесть условия эксплуатации (СП 295).

Преобразовав это уравнение, можно определить высоту сжатой части сердечника как

$$x = (R_s A_s - R A_{cs}) / R_b b. \quad (3)$$

Согласно требованиям норм во всех случаях должно выполняться условие

$$S_c < 0,8 S_0, \quad (4)$$

где S_c и S_0 — статические моменты площади сжатой зоны комплексного сечения и всего комплексного сечения относительно центра тяжести арматуры A_s .

Прочность наклонного сечения определялась из условия

$$Q \leq R_{tw} b z, \quad (5)$$

где R_{tw} — расчетное сопротивление кладки главным растягивающим напряжениям (СП 15); b — ширина сечения; $z = h_0 - x/2$ — плечо пары сил при прямоугольном сечении, h_0 — рабочая высота комплексного сечения.

Также в работе Мешкаускаса [3] отмечена возможность преждевременного разрушения двухслойных элементов из-за нарушения контактного слоя, если не будет выполняться условие

$$Q \leq 0,9 R_p b h_0, \quad (6)$$

где R_p — расчетное сопротивление растяжению менее прочного бетона слоистого сечения.

При расчете возникает вопрос, как необходимо принимать сопротивление для материала оболочки: как для кладки из блоков с учетом присутствия растворного шва (СП 15) или как для непрерывной оболочки из керамзитобетона (СП 63)? Возможно ли оценивать прочность только по расчету армированного сердечника комплексной перемычки как прямоугольной железобетонной балки?

Оценка момента трещинообразования, ширины раскрытия трещин и прогибов элементов на данном этапе исследований не выполнялась.

Для оценки характера распределения напряжений и особенностей напряженно-деформированного состояния выполнено моделирование перемычки комплексного сечения размерами 190×190×2050 (В×Ш×Д) над проемом шириной 1810 мм в программном комплексе Ansys. Для создания анизотропного материала бетонных и керамзитобетонных элементов использовалась конститутивная модель Менетри–Виллама (Menetrey–Willam Base), позволяющая полностью учесть распределение напряжений между соседними конечными элементами вплоть до стадии разрушения [19]. Данная модель максимально точно описывает работу бетона как упругопластического анизотропного материала как до, так и после образования макротрещин в бетоне [20]. Для отображения свойств стальной арматуры применена билинейная изотропная модель пластичности. Для отображения свойств АСК арматуры применена линейная зависимость ($\sigma - \epsilon$), так как известно, что у композитной арматуры практически отсутствует площадка текучести, и разрушение при растяжении носит хрупкий характер. Характеристики модели проверены решением задачи по данным экспериментальных исследований бетонных элементов, армированных АСК (серия 2), проведенных И. А. Антаковым [4]. При моделировании комплексных сечений с помощью SpaceClaim создана

продольная половина перемычек, а эффект от отсеченных частей задан инструментом «симметрия». Контакт поверхностей «оболочка — сердечник», «бетон — арматура» задан Bonded («связанный»). Модель состояла из объемных элементов размером не более 20 мм. Условия закрепления шарнирные на расстоянии 2/3 от края l_{loc} . Нагрузка приложена как равномерно распределенная, до разрушения материала. Собственный вес модели задавался автоматически.

Результаты

Для всех типов перемычек выполнены расчеты с учетом варьирования параметров. Результаты, вычисленные по формулам (1)–(3) для перемычки типа 1 ($R_b = 11,0$ МПа; $R_{мин} = 2,6$ МПа; $R_{макс} = 3,5$ МПа), сведены в табл. 2, из данных которой видно незначительное различие значений при расчете комплексного сечения. По материалу сердечника сечение рассчитано по методике СП 63 как прямоугольная железобетонная балка, при этом $\xi \geq \xi_R$. При изменении геометрии сечения — привязке рабочей арматуры $a = 25$ мм — и увеличении площади арматуры на 2×10A500 несущая способность комплексного сечения ощутимо увеличивается до 15,63 кН/м, однако дальнейшее увеличение площади арматуры на 2×12 (226 из 240, близко к 1,5 %) невозможно, так как не выполняется условие (4).

Аналогичные расчеты выполнены для всех типов перемычек. Результаты расчета

второй перемычки близки к таковым у первой, однако у третьей при снижении прочности сердечника (прочность легкого бетона сердечника принята с понижающим коэффициентом 0,8) необходима корректировка сечения — уменьшение площади арматуры из-за невыполнения условия (4). Средние значения показателей для всех типов перемычек приведены в табл. 3.

По результатам компьютерного моделирования установлены схемы деформированного состояния, аналогичные для всех типов перемычек, характерный вид которых показан на рис. 2, и распределение напряжений в поперечном сечении перемычки, представленное на рис. 3. Обобщенные результаты моделирования для всех типов перемычек приведены в табл. 4.

Для всех типов комплексных сечений построены зависимости прогибов от величины нагрузки (рис. 4) и графики развития напряжений в материале сердечника и оболочки (рис. 5).

По результатам моделирования установлено, что несущая способность перемычки с арматурой класса А500 практически в 1,5 раза выше, чем у перемычек с АСК. Трещинообразующие нагрузки близки между собой.

Расстояния между трещинами близки у перемычек 1-го и 2-го типов, у перемычки 3-го типа трещин больше, они расположены плотнее, составляя от 70 до 110 мм. Высота

Таблица 2

Результаты, вычисленные по формулам (1)–(3) для перемычки 1-го типа

Варианты расчетного сечения	Высота сжатой зоны x , мм	Предельный момент, кНм	Несущая способность, кН/м
Только по материалу сердечника (прямоугольное сечение)	146,38	6,9	15,49
Комплексное сечение при оболочке как бетон В3.5	37,6	5,62	12,59
Комплексное сечение при оболочке как кладка из блоков М50 на растворе М50	37,85	5,61	12,56

Таблица 3

Средние значения результатов расчетов комплексных сечений по нормативным методикам

Характеристика	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Несущая способность, кН/м	12,68	11,0	10,71
M_{ult} , кНм	5,66	4,91	4,78
Q_{ult} , кН	8,44	8,44	8,21
Q (по Машкаускасу), кН	8,67	8,67	8,67
Высота сжатой зоны x , мм	35,8	32,11	38,4

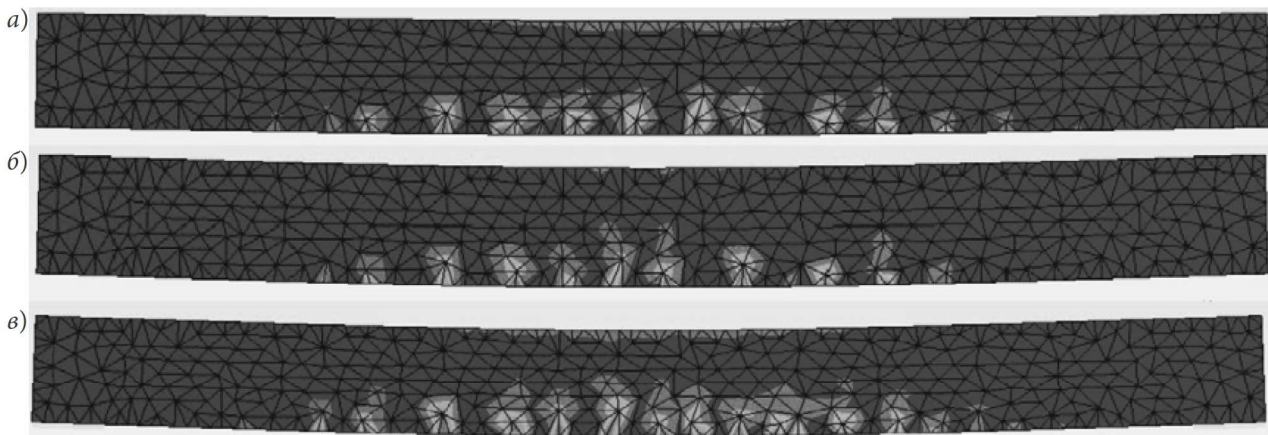


Рис. 2. Развитие деформаций при M_{ult} : а — тип 1, $f_{max} = 11,9$ мм; б — тип 2, $f_{max} = 19,94$ мм; в — тип 3, $f_{max} = 22,6$ мм

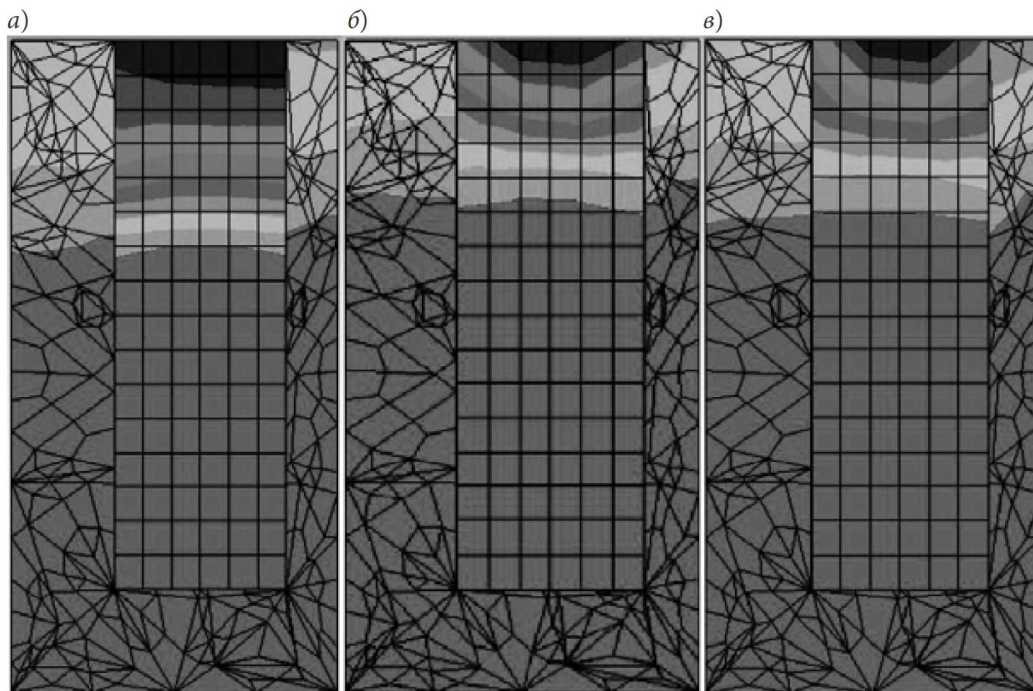


Рис. 3. Распределение напряжений в материале оболочки и сердечника при различном M_{ult} :
 а — $\sigma_{b,max} = -12,43$ МПа, $\sigma_{bt,max} = 1,0$ МПа; б — $\sigma_{b,max} = -12,7$ МПа, $\sigma_{bt,max} = 0,82$ МПа;
 в — $\sigma_{b,max} = -12,59$ МПа, $\sigma_{bt,max} = 0,9$ МПа

Таблица 4

Результаты компьютерного моделирования комплексных сечений перемычек

Характеристика	Тип 1	Тип 2	Тип 3
M_{sc} , кНм	0,737	0,737	0,645
Трещинообразующая нагрузка, кН/м	1,37	1,37	1,20
M_{ult} , кНм	6,73	4,535	4,70
Разрушающая нагрузка, кН/м	13,6	9,17	9,5
Высота сжатой зоны x , мм	60	47	50
Напряжения в арматуре σ_s , МПа	500	359	325
Деформации арматуры, мм	0,0025	0,0065	0,0059
Напряжения в сердечнике σ_c , МПа	12,43	12,79	12,59
Напряжения в оболочке σ_b , МПа	3,68	3,72	4,01
Деформации в оболочке, мм	0,0125	0,032	0,0264
Расстояние между трещинами, мм	100–110	100	70–100
Высота трещин, мм	100	130	140
Прогиб, мм	11,89	19,94	22,65
f/l_0	1/172	1/103	1/91

раскрытия трещин больше у перемычек с АСК и составляет до 140 мм, у перемычек 1-го типа высота развития трещин до 100 мм.

Обсуждение

Из рис. 4 ясно видна концентрация сжимающих напряжений в бетоне сердечника

и отличие по интенсивности и высоте сжимающих напряжений в перемычках всех типов. Высота сжатой зоны и интенсивность напряжений в сечении в перемычках с АСК близки между собой, изополя имеют вид трапеции. В перемычке 1-го типа сжатая зона сердечника больше и подобна прямоугольнику, что хорошо согласуется с данными других авторов, описывающих, что сжатая зона в нормальном сечении у элементов с композитной арматурой значительно, по сравнению с железобетонными, уменьшается после появления трещин [7, 12].

На графиках рис. 4 хорошо видны два участка работы для перемычек второго и третьего типа — до и после образования трещин, что также согласуется с данными других исследователей, описывающих билинейные зависимости диаграмм для балок с АПК «изгибающий момент — прогиб» под нагрузкой [8, 9]. У комплексных перемычек прогибы развиваются одинаково плавно до величин 1,5–2,0 мм при нагрузке до 1,7 т/м² (34 % от разрушающей), что соответствует 9–10 % от максимального прогиба. Далее начинается интенсивный рост деформаций, графики параллельны, у перемычки третьего типа прогиб больше — до 13 %, а также нагрузка, при которой происходит излом графика

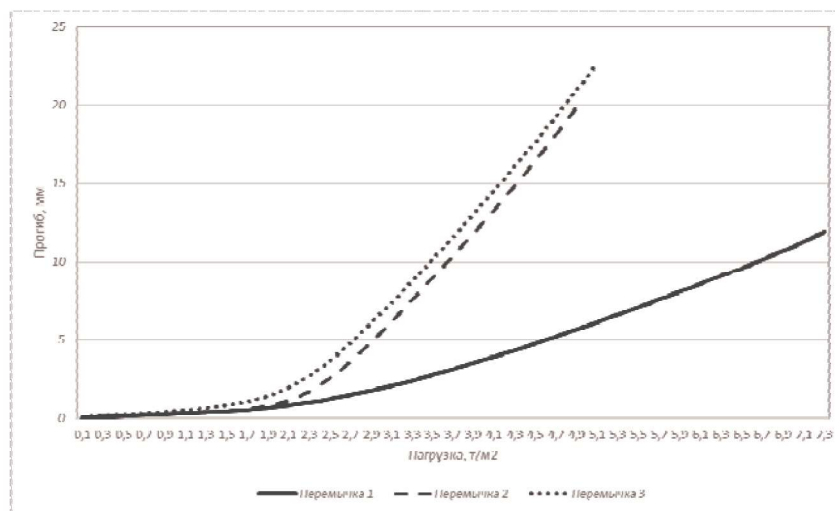


Рис. 4. Развитие прогибов

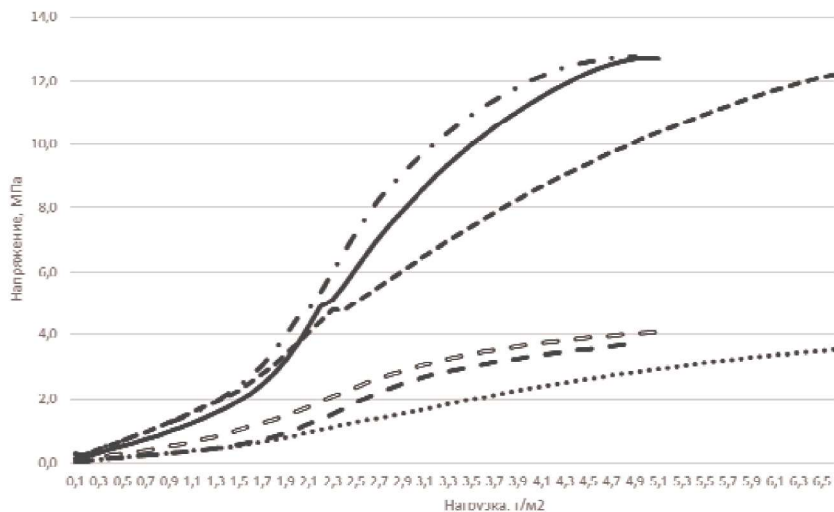


Рис. 5. Развитие максимальных нормальных напряжений в сердечнике и оболочке

и начинается 2-й участок, ниже, чем у перемычки с сердечником из тяжелого бетона В15. У перемычки 1-го типа с металлической арматурой график более плавный, изменение интенсивности выражено слабее, прогиб в 1,5–2,0 мм получен при нагрузке около 40 % от разрушающей, дальнейшая интенсивность развития деформаций ниже, чем у перемычек 1-го и 2-го типов со стеклопластиковой арматурой. При разрушении у перемычки 1-го типа максимальный прогиб практически в два раза меньше, чем у перемычек 2-го и 3-го типов. Различие прогибов сечений с металлической и композитной арматурой меньше, чем для балок в работах [13, 14, 22, 23], где разница составляет 3–4 раза, что можно объяснить идеальным сцеплением по всей длине арматуры в модели, тогда как экспериментальные балки разрушались при нарушении сцепления АСК с бетоном, отмечено много случаев разрушения по наклонным сечениям [4, 15, 21].

Графики максимальных нормальных напряжений в сердечниках (рис. 5) у перемычек 2-го и 3-го типов идентичны, криволинейные, с видимым изломом. Также на графиках можно увидеть, что до определенной нагрузки (38–45 % от разрушающей) проис-

ходит линейное увеличение максимальных нормальных напряжений в сердечнике, затем происходит излом графика, и напряжения развиваются с большей интенсивностью до уровня 85–90 % от разрушающей нагрузки, после чего интенсивность развития нормальных напряжений в сердечнике увеличивается плавно до момента разрушения. У перемычки 1-го типа график развития максимальных нормальных напряжений на первом участке аналогичен до нагрузки в 2,5 т/м² (34 % от разрушающей), излом графика менее выражен.

Графики развития нормальных напряжений у оболочек повторяют графики развития нормальных напряжений сердечников с меньшей интенсивностью. На этих графиках практически отсутствуют площадки излома. Уровень напряжений в оболочке, соответствующих скачку напряжений в сердечниках, составляет $0,27\sigma_{ult}$, $0,32\sigma_{ult}$ и $0,5\sigma_{ult}$. При этом напряжения оболочек меньше, их величины — 21, 27 и 40 % от напряжений сердечника. Максимальные напряжения в оболочках σ_{ult} близки для 1-го и 2-го типов ($\approx 3,7$ МПа), у перемычки 3-го типа значение выше на 8 % (4,0 МПа). Величина напряжений в оболочках при предельной нагрузке

составила 22, 29 и 32 % от напряжений сердечника соответственно, что говорит о лучшем включении в совместную работу сечений оболочки при использовании композитной арматуры.

Анализ напряжений, полученных в арматурных стержнях, показал, что прочность арматуры АСК остается недоиспользованной, величина напряжений в перемычках 2-го и 3-го типов составила 30 и 27 % от предельной прочности. В стальной арматуре получены напряжения, соответствующие площадке текучести, поэтому можно сделать вывод о пластическом характере разрушения перемычек 1-го типа. Для перемычек с АСК получен хрупкий характер разрушения от раздробления бетона сжатой зоны без разрыва арматуры.

Результаты предварительных расчетов значительно отличаются от компьютерного моделирования, что может объясняться как несовершенством модели — несовпадением КЭ элементов сердечника и оболочки, так и для композитной арматуры хрупким характером разрушения элементов.

Перемычка заполнения каркаса по указаниям СП 15 рассчитывается на вес свежеложенной кладки над проемом с учетом зимнего исполнения на высоту проема. Нагрузка, действующая на перемычку при размере проема 1810 мм, составляет 0,76 кН/м с учетом заполнения пустот блоков раствором, при этом собственный вес перемычки 140,8 кг. По результатам моделирования несущая способность комплексных сечений, особенно при минимальном защитном слое для арматуры, достаточна и сопоставима с железобетонными брусковыми перемычками. Есть резерв несущей способности, если рассматривать совместную работу комплексной перемычки и вышележащей кладки аналогично [2]. Однако полученное расхождение результатов моделирования и расчетов достаточно велико, что показывает необходимость уточнения рассмотренных

нормативных методик расчета комплексных сечений, для чего необходимо проведение многофакторных экспериментальных исследований с целью определения вовлеченности элементов сечения в работу, сцепления элементов сечения между собой, влияния трещин в сердечнике и оболочке элемента на величину фактических прогибов. Перспективное направление исследований — оценка прочности комплексных сечений, особенно при использовании АСК, с применением диаграммных методов по аналогии с железобетонными конструкциями [21, 24].

Выводы

1. Выполненное моделирование напряженно-деформированного состояния трех типов комплексных сечений позволило установить особенности их напряженно-деформированного состояния, влияние вида арматуры и бетона сердечника на величины разрушающих и трещинообразующих нагрузок, распределение напряжений в сечении и по длине элемента, характер развития трещин и изменение прогибов при их появлении.

2. С учетом требований действующих нормативных методик выполнены расчеты комплексного сечения по прочности, адаптированные с учетом применения композитной арматуры.

3. Сопоставление результатов расчета и моделирования показало значительное расхождение результатов, что требует уточнения методики расчетов комплексных сечений.

Библиографический список

1. Горин В. М. Применение керамзитобетона в строительстве — путь к энерго- и ресурсоэффективности, безопасности зданий и сооружений // Строительные материалы. 2010. № 8. С. 8–11.

2. Шиболдасов А. А. Перемычки армированные из ячеистого бетона автоклавного твердения. Исследование работы перемычек с вышележащей кладкой на полиуретановом клею // Современный автоклавный газобетон: сб. докл. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 22–24 ноября 2017 г. / под ред. науч.-техн. совета

Национальной ассоциации производителей автоклавного газобетона. 2017. С. 108–111.

3. Корнев Н. А., Кудрявцев А. А. Расчет конструкций из легких бетонов марок 100 и ниже. М.: Стройиздат, 1967. 108 с.

4. Антаков И. А. Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой // Жилищное строительство. 2018. № 5. С. 15–18.

5. Бегунова Н. В., Грахов В. П., Возмищев В. Н., Кислякова Ю. Г. Сравнительная оценка результатов испытаний бетонных балок с композитной арматурой и расчетных данных // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 2. С. 155–163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163.

6. Mirsayapov I., Apkhadze G. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar // STCCE-2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 29th April – 15th May 2020. Vol. 890. 012079.

7. Adam M. A., Said M., Mahmoud A. A., Shanour A. S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 84. Pp. 354–366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057.

8. Acciai A., D'Ambrisi A., De Stefano M., Feo L., Focacci F., Nudo R. Experimental response of FRP reinforced members without transverse reinforcement: Failure modes and design issues // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 89. Pp. 397–407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.002.

9. Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams // Engineering Structures. 2017. Vol. 131. Pp. 231–242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007.

10. Мирсаяпов И. Т., Антаков И. А., Антаков А. Б. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 12. С. 1663–1672.

11. Мирсаяпов И. Т., Антаков И. А., Антаков А. Б. К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, № 4. С. 413–428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413–428.

12. Kim S., Kim S. Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2019. Vol. 18. No. 2. Pp. 89–97. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814.

13. Ruan X. J., Lu C. H., Xu K., Xuan G. Y., Ni M. Z. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars //

Composite Structures. 2019. Vol. 235 (6). 111772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772.

14. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Issue 5. Pp. 2125–2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007.

15. Хозин В. Г., Гиздатуллин А. Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 30–38.

16. Крамаренко А. В., Красильникова О. А. Использование композитной арматуры в процессе возведения кладки из керамзитобетонных блоков // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). 2018. № 1. С. 215–218.

17. Пономарев А. В. Применение композитной арматуры для производства армированных газобетонных изделий автоклавного твердения // Современный автоклавный газобетон: сб. докл. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 22–24 ноября 2017 г. / под ред. науч.-техн. совета Национальной ассоциации производителей автоклавного газобетона. 2017. С. 61–63.

18. Пат. 217281, Российская Федерация, МПК E04C 3/02. Перемычка с железобетонным сердечником в несъемной опалубке из керамзитобетона / К. А. Фабричная, Э. К. Миндубаев, Е. В. Хорьков. № 2022131165, заявл. 30.11.2022, опубл. 24.03.2023.

19. Dmitriev A., Novozhilov Yu., Mikhalyuk D., Lalin V. Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 88. 8804. DOI:10.18720/CUBS.88.4.

20. Menétrey P., Willam K. J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization // ACI Structural Journal. 1995. Vol. 92 (3). Pp. 311–318.

21. Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A. Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057.

22. Антаков И. А., Сулейманов А. М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 101–109.

23. Мирсаяпов И. Т., Лим В. А., Мирсаяпов А. И., Сулейманов А. М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 145–153.

24. Мирсаяпов И. Т., Минзянов Р. И. Перемещение арматуры периодического профиля в заделке при

статическом нагружении // Известия КГАСУ. 2022. № 4 (62). С. 18–29.

References

- Gorin V. M. *Primenenie keramzitobetona v stroitel'stve — put' k energo- i resursoeffektivnosti, bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy* [Application of expanded clay concrete in construction as the way to energy and resource efficiency, safety of buildings and structures]. *Stroitel'nye materialy – Construction Materials*, 2010, no. 8, pp. 8–11.
- Sheboldasov A. A. *Peremychki armirovannye iz yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya. Issledovanie raboty peremychek s vyshlezhashchey kladkoy na poliuretánovom kleyu* [Intersections reinforced from cellular concrete of autoclaved curing. Research of lintels' performance with overlying masonry on polyurethane glue]. *Trudy nauch.-prakt. konf. Ekaterinburg, 22–24 noyabrya 2017 g «Sovremenniy avtoklavniy gazobeton»* [Proceedings of the scientific and practical conference Ekaterinburg, November 22–24, 2017 “Modern autoclaved aerated concrete”]. Edited by the Scientific and Technical Council of the National Association of Autoclaved Aerated Concrete Producers. 2017, pp. 108–111.
- Kornev N. A., Kudryavtsev A. A. *Raschet konstruktsiy iz legkikh betonov marok 100 i nizhe* [Calculation of structures from lightweight concrete of grade 100 and below]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1967, 108 p.
- Antakov I. A. *Osobennosti raboty izgibaemykh elementov s kompozitnoy polimernoy armaturoy pod nagruzkoj* [Features of work of bending elements with composite polymer armature under load]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2018, no. 5, pp. 15–18.
- Begunova N. B., Grakhov V. P., Vozmishchev V. N., Kislyakova Yu. G. *Sravnitel'naya otsenka rezul'tatov ispytaniy betonnykh balok s kompozitnoy armaturoy i raschetnykh dannykh* [Comparative evaluation of test results of concrete beams with composite reinforcement and design data]. *Nauka i tekhnika – Science and Technology*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 155–163. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-155-163.
- Mirsayapov I., Apkhadze G. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar. *Proceedings of the STCCE-2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 29th April – 15th May 2020, Kazan, Russia. Kazan, 2020, vol. 890, 012079.
- Adam M. A., Said M., Mahmoud A. A., Shanour A. S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 84, pp. 354–366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057.
- Acciai A., et al. Experimental response of FRP reinforced members without transverse reinforcement: Failure modes and design issues. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 89, pp. 397–407. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.01.002.
- Barris C., et al. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 2017, vol. 131, pp. 231–242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007.
- Mirsayapov I. T., Antakov I. A., Antakov A. B. *K raschetu shiriny raskrytiya treshchin izgibaemykh betonnykh elementov, armirovannykh kompozitnoy polimernoy armaturoy* [To calculation of crack opening width of bending concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSCU*, 2020, vol. 15, no. 12, pp. 1663–1672.
- Mirsayapov I. T., Antakov I. A., Antakov A. B. *K raschetu progibov izgibaemykh betonnykh elementov, armirovannykh kompozitnoy polimernoy armaturoy* [To calculation of deflections of bending concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MSCU*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 413–428. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.413–428.
- Kim S., Kim S. Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 89–97. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814.
- Ruan X. J., et al. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars. *Composite Structures*, 2019, vol. 235 (6), 111772. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772.
- Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behaviour of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, iss. 5, pp. 2125–2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007.
- Khazin V. G., Gizdatullin A. R. *Sovmestimost' polimerkompozitnoy armatury s tsementnym betonom v konstruktsiyakh* [Compatibility of polymer-composite reinforcement with cement concrete in structures]. *Stroitel'nye materialy – Construction Materials*, 2017, no. 11, pp. 30–38.
- Kramarenko A. V., Krasil'nikova O. A. *Ispol'zovanie kompozitnoy armatury v protsesse vozvedeniya kladki iz keramzitobetonnykh blokov* [Use of composite reinforcement in the process of erection of masonry from keramzite concrete blocks]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (Politekhnikheskiy vestnik) – Science.Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*, 2018, no. 1, pp. 215–218.
- Ponomarev A. V. *Primenenie kompozitnoy armatury dlya proizvodstva armirovannykh gazobetonnykh izdeliy avtoklavnogo tverdeniya* [Application of composite reinforcement for the production of reinforced aerated

concrete products of autoclave curing]. *Trudy nauch.-prakt. konf. Ekaterinburg, 22–24 noyabrya 2017 g. «Sovremenniy avtoklavniy gazobeton»* [Proceedings of the sci.-pract. conf. Ekaterinburg, November 22–24, 2017 “Modern autoclaved aerated concrete”]. Ed. by Nauch.-tekhn. sovet Natsional'noy assotsiatsii proizvoditeley avtoklavnogo gazobetona, 2017, pp. 61–63.

18. Fabrichnaya K. A., Mindubaev E. K., Khor'kov E. V. *Peremychka s zhelezobetonnym serdechnikom v nes'emnoy opalubke iz keramzitobetona* [Intersection with reinforced concrete core in permanent formwork made of expanded claycrete]. Patent RF, no. 217281, 2023.

19. Dmitriev A., Novozhilov Yu., Mikhalyuk D., Lalin V. Calibration and validation of the Menetrey-Willam constitutive model for concrete. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2020, vol. 88, 8804. DOI:10.18720/CUBS.88.4.

20. Menétrey P., Willam K. J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*, 1995, vol. 92 (3), pp. 311–318.

21. Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A. Improving methods of strength design of normal sections of flexural

concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Proceedings of the IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 890, 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057.

22. Antakov I. A., Suleymanov A. M. *Deformativnost' izgibaemykh betonnykh elementov, armirovannykh polimernoy kompozitnoy armaturoy* [Deformability of bending concrete elements reinforced with polymer composite reinforcement]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU*, 2023, no. 3 (65), pp. 101–109.

23. Mirsayapov I. T., Lim V. A., Mirsayapov A. I., Suleymanov A. M. *Otsenka effektivnosti primeneniya vysokomodul'noy polimernoy kompozitnoy armatury* [Estimation of efficiency of application of high-modulus polymer composite reinforcement]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU*, 2023, no. 3 (65), pp. 145–153.

24. Mirsayapov I. T., Minzyanov R. I. *Peremeshchenie armatury periodicheskogo profilya v zadelke pri staticheskom nagruzhении* [Displacement of periodic profile reinforcement in the embedment under static loading]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU*, 2022, no. 4 (62), pp. 18–29.