

**Дзюба В. А., Арсентьева К. А., Журавлева Е. В.**  
**V. A. Dzyuba, K. A. Arsenteva, E. V. Zhuravleva**

**ПАРАМЕТРЫ ДИАГРАММ «МОМЕНТ-КРИВИЗНА» ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С АРМАТУРОЙ А500 НА СТАДИИ БЛИЗКОЙ К РАЗРУШЕНИЮ**

**PARAMETERS OF «MOMENT-CURVATURE» DIAGRAMS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH A500 REINFORCEMENT AT THE STAGE CLOSE TO DESTRUCTION**

**Дзюба Виктор Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: dzyuba456@mail.ru.

**Viktor A. Dzyuba** – PhD in Engineering, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: dzyuba456@mail.ru.

**Арсентьева Ксения Александровна** – студент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: dika44512@gmail.com.

**Ksenia A. Arsenteva** – Student, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: dika44512@gmail.com.

**Журавлева Екатерина Викторовна** – аспирант кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: minskaya\_ekaterina@mail.ru.

**Ekaterina V. Zhuravleva** – Graduate Student, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: minskaya\_ekaterina@mail.ru.

**Аннотация.** Приведены результаты исследований пластических деформаций железобетонных конструкций на стадии близкой к разрушению с использованием диаграмм «момент-кривизна». Установлены значения деформаций бетона и арматуры, соответствующие началу и концу пластической стадии на диаграмме «момент-кривизна», и параметры ниспадающего участка этих диаграмм для разных величин относительной высоты сжатой зоны и классов бетона. Определена протяжённость пластического участка железобетонного элемента при различных процентах армирования и классах бетона, влияющая на перераспределение усилий. Для исследуемых элементов предложены кусочно-линейные диаграммы «момент-кривизна».

**Summary.** The results of studies of plastic deformations of reinforced concrete structures at the stage close to failure using «moment-curvature» diagrams are presented. The values of concrete and reinforcement deformations corresponding to the beginning and the end of the plastic stage on the «moment-curvature» diagram and the parameters of the descending section of these diagrams for different values of the relative height of the compressed zone and concrete classes have been determined. The extent of the plastic section of a reinforced concrete element at different percentages of reinforcement and concrete classes, influencing the redistribution of forces, is determined. Piecewise linear diagrams «moment-curvature» are proposed for the investigated elements.

**Ключевые слова:** арматура, текучесть, предельная деформация, изгибная жёсткость, физическая нелинейность, кривизна, нисходящая ветвь.

**Key words:** reinforcement, fluidity, ultimate deformation, bending stiffness, physical nonlinearity, curvature, descending branch.

*Исследование выполнено за счёт гранта Министерства образования и науки Хабаровского края № 42С/2023.*

**Введение.** Учёт пластических свойств железобетона позволяет выявить резервы прочности конструктивной системы и повысить технико-экономическую эффективность проектных решений [1; 2; 13]. Поэтому исследования, направленные на совершенствование методов проектирования зданий с учётом неупругих свойств железобетона, являются актуальными [7; 12; 14]. Деформационные свойства сечения при изгибе определяются зависимостью между изгибающим моментом и кривизной. Расчёт несущей системы с учётом физической нелинейности основан на применении таких зависимостей с описанием для них параметров пластичности, предельной кривизны и ниспадающего участка на диаграмме «момент-кривизна».

**Постановка задачи исследования.** Характер диаграммы деформирования зависит от степени армирования, класса бетона и других факторов. Особое значение для диаграммы «М- $\alpha$ » имеет поведение продольной арматуры, поэтому в данной работе экспериментально изучались деформационные свойства арматурной стали класса А500. Автоматизированный расчёт диаграмм при изгибе выполнялся по деформационной расчётной модели [3; 9; 10; 11]. При этом зависимости для сжатого и растянутого бетона принимались согласно [4] с учётом работ [6; 8].

**Выполнение исследований.** Программа исследований включала в себя изучение поведения железобетонных элементов с размерами поперечного сечения 60×20 см и арматурой класса А500 на стадии близкой к разрушению и оценку их пластических свойств. В процессе машинных экспериментов варьировались те параметры, которые влияют на пластические свойства железобетонных элементов при изгибе: класс бетона, относительная высота сжатой зоны и процентное содержание продольной арматуры. Поперечное армирование при определённых условиях тоже может существенно изменить поведение железобетонного элемента в стадии псевдопластического деформирования, влияя на работу сжатого бетона, что мы наблюдали в проведённых ранее экспериментах [5]. Диаграмма состояния растянутой арматуры принималась по результатам испытаний на машине INSTRON арматурной стали класса А500 диаметром 12 мм, изготовленной Комсомольским-на-Амуре металлургическим предприятием ООО «Амурсталь». Средние по образцам деформации в начале и в конце площадки текучести составили соответственно  $2,9 \times 10^{-3}$  и  $19,8 \times 10^{-3}$  при значении предела текучести 555 МПа.

На первом этапе оценивалось влияние класса бетона. Были построены полные диаграммы «момент-кривизна» для разных классов бетона при трёх значениях относительной высоты сжатой зоны:

1.  $\xi = 0,1$ . Характер зависимостей был сохранён для всех классов бетона. Все графики имели восходящий участок, пластическую стадию и ниспадающий участок. Программный комплекс позволил оценивать изменение напряжённо-деформированного состояния сечения на всех этапах расчёта. Для восходящего участка отмечались незначительное снижение жёсткости за счёт нелинейной работы растянутого бетона до образования трещин и изменение угла наклона графика «М- $\alpha$ » после появления трещин. Ключевой точкой на диаграмме является точка, при которой начинается пластическая стадия. Деформации бетона на крайнем сжатом волокне и растянутой арматуры в этот момент обозначены  $\varepsilon_{b1,pl}$  и  $\varepsilon_{s1,pl}$  соответственно, а кривизна –  $\alpha_{1,pl}$ . Расчёты показали, что для всех классов бетона величина  $\varepsilon_{b1,pl}$  практически не изменялась (см. табл. 1) и может рассматриваться как фиксированный параметр. В вычислениях для изгибаемых элементов при других размерах сечений (45×15 см и 90×30 см) с такими же классами бетона и значением  $\xi = 0,1$  деформация  $\varepsilon_{b1,pl}$  осталась без изменений. Деформации растянутой арматуры в момент начала пластической стадии сечения  $\varepsilon_{s1,pl}$  равны деформациям в начале площадки текучести на диаграмме растяжения арматуры и всегда считаются известными при диаграммном методе расчёта.

Деформации бетона на крайнем сжатом волокне и в растянутой арматуре в момент, соответствующий окончанию пластической стадии на диаграмме «М- $\alpha$ », обозначены  $\varepsilon_{b2,pl}$ ,  $\varepsilon_{s2,pl}$ , а кривизна –  $\alpha_{2,pl}$ . Как показали машинные эксперименты, деформация  $\varepsilon_{b2,pl}$  также является фиксированной величиной (см. табл. 1) при  $\xi = 0,1$  независимо от размеров сечения. Деформация растяну-

той арматуры при кривизне  $\alpha_{2,pl}$  соответствует значению деформации в конце площадки текучести экспериментальной диаграммы растяжения арматуры.

Таблица 1

Деформации параметрических точек «момент-кривизна»

Класс бетона	Деформации параметрических точек ( $\varepsilon \cdot 10^3$ )					$\Delta M, \%$
	$\varepsilon_{b1,pl}$	$\varepsilon_{b2,pl}$	$\varepsilon_{b1}$	$\varepsilon_{b2}$	$\varepsilon_{s2}$	
B20	0,8	2,6	1,6	7,8	13,1	9,40
B40	0,9	2,7	1,7	6,2	10,4	8,07
B60	1,0	2,8	1,8	5,2	8,71	6,67

В расчётах железобетонных элементов при малых значениях  $\xi = 0,1$  после достижения в растянутой арматуре деформаций  $\varepsilon_{s2,pl}$  фиксировалась стадия так называемой псевдопластичности, что соответствует ранее проведённым испытаниям сжато-изогнутых элементов [8]. Результаты расчётов показали, что арматура после текучести переходит работать в зону упрочнения. Высота сжатой зоны бетона, которая уменьшалась при текучести арматуры, начинает расти и уравнивает увеличение усилия в арматуре. Это приводит к незначительному росту изгибающего момента, образуя стадию псевдопластичности. На дальнейших этапах расчёта суммарное усилие в сжатом бетоне за счёт разрушения краевых волокон начинает снижаться, точка приложения этого усилия смещается к растянутой грани элемента, а в растянутой арматуре начинается разгрузка. Этот процесс определяет ниспадающую ветвь на диаграмме «момент-кривизна» при разрушении сечения (см. рис. 1, а).

Предельную кривизну в конце стадии псевдопластичности обозначим  $\alpha_3$  и введём параметр  $k_{\alpha}$  как коэффициент, учитывающий стадию псевдопластического деформирования. Тогда кривизна  $\alpha_3 = \alpha_{2,pl} \cdot k_{\alpha}$ , где значения  $k_{\alpha}$  равны 2,7; 2,1; 1,8 соответственно для бетонов класса B20, B40 и B60 по результатам проведённых машинных экспериментов. Таким образом, суммарная протяжённость пластического участка при бетоне B20 на 21 % больше, чем при бетоне B40, и на 32 % больше, чем при бетоне B60, что определяется непосредственно диаграммами сжатия бетона. Предельные деформации бетона с увеличением его класса снижаются, а ниспадающая ветвь становится более крутой, что и приводит к уменьшению предельной кривизны железобетонных элементов для более прочных бетонов.

2.  $\xi = 0,25$ . В этом машинном эксперименте рассматривались железобетонные элементы с такой же диаграммой рабочей арматуры, размерами сечения и классами бетона. Относительная высота сжатой зоны принималась меньше граничной. Аналогично элементам с  $\xi = 0,1$ , полученные диаграммы имели три основных участка: восходящий, пластический и ниспадающий. На восходящем участке сохранялась практически линейная зависимость до момента образования трещин, а также и после образования трещин, но уже с пониженной жёсткостью. Кривизны в начале и в конце пластического участка обозначены  $\alpha_{1,pl}$  и  $\alpha_{2,pl}$ . Поведение этой группы образцов в пластической стадии отличалось от образцов, рассчитанных при  $\xi = 0,1$ , т. к. увеличилось количество арматуры. Поэтому к началу пластической стадии ( $\alpha_{1,pl}$ ) деформации сжатого бетона и высота сжатой зоны были более значительными, чем в первых расчётах. Как и в первой серии, деформация на крайнем сжатом волокне  $\varepsilon_{b1}$  для элементов с различными размерами поперечного сечения имела фиксированное значение, практически не зависящее от класса бетона (см. табл. 1). Деформации растянутой арматуры в сечении при вычислении  $\alpha_{1,pl}$  равны деформациям  $\varepsilon_s$  в начале площадки текучести диаграммы « $\sigma_s - \varepsilon_s$ ». В пластической стадии работы элемента усилие в арматуре оставалось постоянным, соответствующим пределу текучести. Однако изгибающий момент при этом начинал снижаться на 7-9 % к концу пластической стадии (см. табл. 1), т. к. уменьшался момент сжатой зоны. Это связано с более равномерным напряжением волокон сжатой зоны и меньшей способностью их к перераспределению в пределах сечения при высоком значении  $\xi$ . За окончание пластической стадии предложено принимать кривизну  $\alpha_{2,pl}$ . При этой кривизне начинается разгрузка растянутой

арматуры (см. рис. 1, б). Деформации арматуры  $\varepsilon_{s2}$  и соответствующие им деформации бетона на крайнем сжатом волокне  $\varepsilon_{b2}$  приведены в табл. 1. Значения  $\varepsilon_{b2}$  в этом случае не остаются постоянными, как при  $\xi = 0,1$ , а зависят от класса бетона, т. к. арматура не успевает пройти полностью площадку текучести и начало разгрузки арматуры определяется неупругими свойствами сжатого бетона. Поэтому величины  $\varepsilon_{b2}$  и  $\varepsilon_{s2}$  снижаются с повышением класса бетона. На этапе ниспадающей ветви происходит дальнейшая разгрузка арматуры, напряжения в краевых волокнах сжатого бетона равны нулю и нейтральная ось перемещается к растянутой арматуре.

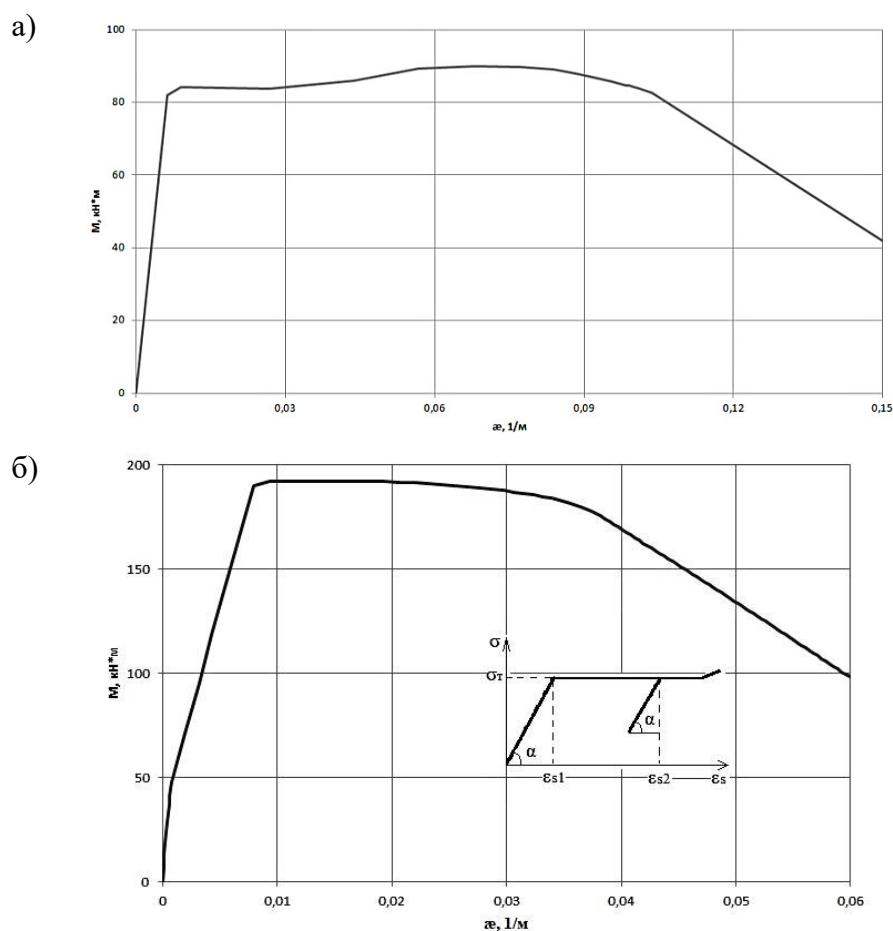


Рис. 1. Полные диаграммы «момент-кривизна» для железобетонных элементов с арматурой А500: а – при  $\xi = 0,1$ ; б – при  $\xi = 0,25$

3.  $\xi = 0,5$ . Расчёт железобетонных элементов показал, что их поведение полностью соответствует работе переармированных сечений. Арматура работала в упругой стадии, за исключением расчёта при бетоне класса В20, где она смогла достигнуть начала текучести. Пластичность сечений в этом случае отсутствовала, и характер диаграммы «момент-кривизна» полностью определялся деформативностью сжатого бетона.

Для оценки пластических свойств на стадии близкой к разрушению проведены машинные эксперименты образцов с процентами армирования 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,5 и тремя классами бетона В20, В40 и В60. В результате расчёта двадцати одного элемента с размерами поперечного сечения 60×20 см построены полные (с ниспадающим участком) диаграммы «момент-кривизна», выполнен анализ деформационных параметров в пластической стадии. Для каждого элемента определена протяжённость пластического участка  $L_{pl}$ .

Элементы при низком классе бетона имели ограниченную пластическую зону, и уже при  $\mu$  более 1 % арматура работала только в упругой стадии. Для бетонов высокой прочности пластическая зона сохранялась и при больших процентах армирования, но имея естественную тенденцию к

снижению с увеличением  $\mu$ . Определяющим параметром в поведении сечения, достижении максимальных деформаций и пластичности является, как известно, относительная высота сжатой зоны, которая в совокупности учитывает и влияние армирования, т. к.  $\xi = R_s \cdot \mu / R_b$ . При неоднородном напряжённом состоянии по высоте сечения появляется возможность перераспределения усилий между волокнами сжатой зоны, что способствует реализации пластических свойств арматуры А500. Пластичность каждого элемента оценивали параметром  $L_{pl}$ , который вычислялся как разность кривизны в конце и в начале пластического участка. Дополнительно также определялись значения  $\Delta \sum \varepsilon$  – разность суммы деформаций крайнего сжатого волокна и растянутой арматуры в конце и в начале пластического участка без учёта рабочей высоты сечения.

Для элементов из бетона класса В20 наибольшая пластичность наблюдалась при низком проценте армирования (0,5 %). При большем проценте начинало расти значение  $\xi$  и снижалась пластичность сечения. При проценте армирования равном 1 длина пластического участка на диаграмме «момент-кривизна» для образца из бетона В20 была соответственно в четыре и три раза меньше, чем для бетонов В60 и В40. В образцах с более высокой прочностью бетона рост  $\xi$  замедлялся, сохраняя протяжённый пластический участок с увеличением процента армирования. Наличие такого участка очень важно для расчёта несущих систем с учётом физической нелинейности и перераспределения усилий. У элементов из бетона В40 и В60 хорошие показатели пластичности сохранялись до 1,5 % (см. рис. 2). Таким образом, бетон В40, В60 с высокими показателями прочности позволяет арматуре А500 реализовать свои пластические свойства, делая конструкцию прочной и пластичной. Следует учитывать, что дополнительное поперечное армирование сжатой зоны может являться фактором, увеличивающим пластичность бетона и конструкции в целом.

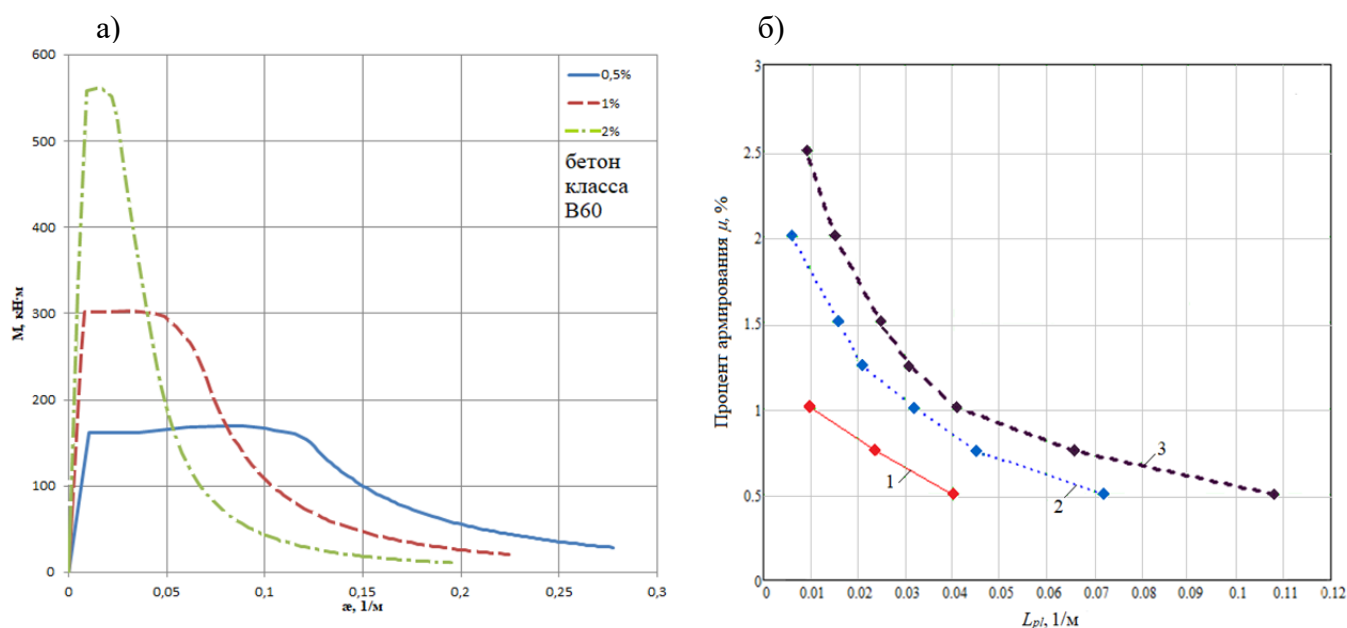


Рис. 2. Влияние процента армирования: а – на полные диаграммы «момент-кривизна»; б – на длину пластического участка; 1 – для бетона В20; 2 – для бетона В40; 3 – для бетона В60

Трансформируем нелинейные диаграммы «момент-кривизна» с пластическими участками в кусочно-линейную модель. Восходящая ветвь диаграммы состоит из двух линейных функций. Первая функция описывает зависимость « $M$ – $\varepsilon$ » до образования трещин. Начальная расчётная изгибная жёсткость соответствовала жёсткости приведённого сечения, вычисленной по требованиям норм. Момент образования трещин  $M_{crc}$  определяли при деформации на крайнем растянутом волокне, равном  $1,5 \cdot 10^{-4}$ . А кривизна в этой точке  $\varepsilon_{crc}$  вычислялась как отношение  $M_{crc}/B_o$ , где  $B_o$  – начальная изгибная жёсткость приведённого сечения. Вторая функция восходящего участка определяется координатами  $(M_{crc}, \varepsilon_{crc}; M_{pl}, \varepsilon_{1,pl})$ . Пластический участок при  $\xi = 0,1$  имеет три характерные кривизны  $\varepsilon_{1,pl}$ ,  $\varepsilon_{2,pl}$  и  $\varepsilon_3$ , которые вычисляются по формулам

$$\alpha_{1,pl} = (\varepsilon_{b1,pl} + \varepsilon_{s1,pl}) / h_0; \quad \alpha_{2,pl} = (\varepsilon_{b2,pl} + \varepsilon_{s2,pl}) / h_0; \quad \alpha_3 = \alpha_{2,pl} \cdot k_{\alpha},$$

где  $\varepsilon_{s1,pl}$ ,  $\varepsilon_{s2,pl}$  – деформации арматуры, соответствующие началу и концу площадки текучести на диаграмме « $\sigma_s$ – $\varepsilon_s$ »;  $\varepsilon_{b1,pl}$ ,  $\varepsilon_{b2,pl}$  – деформации бетона на крайнем сжатом волокне, принимаемые на основе проведённых машинных экспериментов по табл. 1;  $k_{\alpha}$  – коэффициент, учитывающий псевдопластичность сечения и принимаемый в зависимости от класса бетона по данным выполненных машинных экспериментов; приращение изгибающего момента на этой стадии не учитывается в запас прочности (см. рис. 3, а).

Кусочно-линейная модель диаграммы «момент-кривизна» при  $\xi = 0,25$  на пластическом участке имеет две характерные кривизны  $\alpha_{1,pl}$  и  $\alpha_{2,pl}$ , вычисляемые по формулам

$$\alpha_{1,pl} = (\varepsilon_{b1} + \varepsilon_{s1,pl}) / h_0; \quad \alpha_{2,pl} = (\varepsilon_{b2} + \varepsilon_{s2}) / h_0,$$

где  $\varepsilon_{s1,pl}$  – деформация арматуры, соответствующая началу площадки текучести на диаграмме « $\sigma_s$ – $\varepsilon_s$ »;  $\varepsilon_{s2}$  – деформация в арматуре в момент начала разгрузки (см. рис. 1, б), принимаемая по табл. 1;  $\varepsilon_{b1}$  и  $\varepsilon_{b2}$  – деформации бетона на крайнем сжатом волокне, принимаемые на основе проведённых машинных экспериментов по табл. 1.

На пластическом участке учитывается снижение изгибающего момента (см. рис. 3, б). Процент уменьшения момента  $M_{pl}$  до значения  $M_2$  при кривизне  $\alpha_{2,pl}$  приведён в табл. 1. Значения коэффициента  $k_{0,5}$  для вычисления кривизны  $\alpha_{0,5} = k_{0,5} \cdot \alpha_{2,pl}$  при изгибающем моменте  $0,5M_{pl}$  приведены в табл. 2.

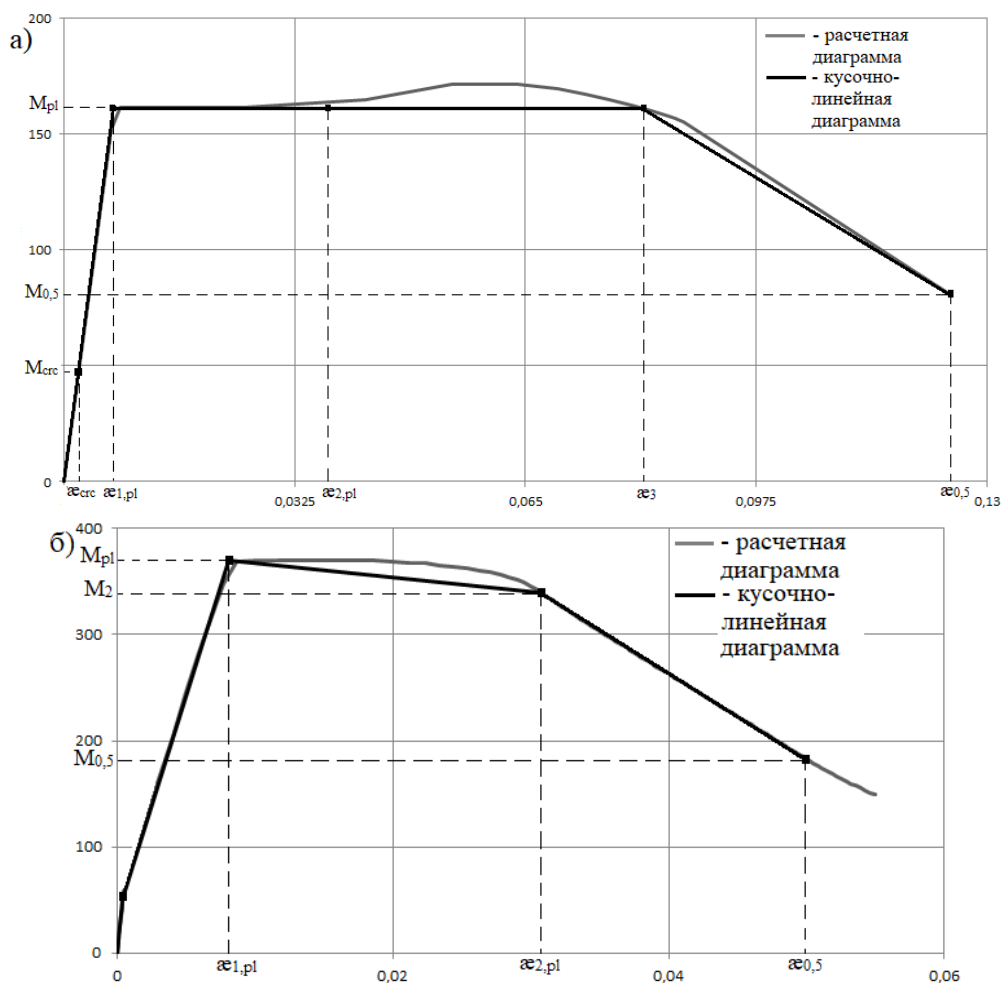


Рис. 3. Кусочно-линейные диаграммы «момент-кривизна»  
а – при  $\xi = 0,1$ ; б – при  $\xi = 0,25$

Значения коэффициента  $k_{0,5}$ 

Класс бетона	При $\xi = 0,1$	При $\xi = 0,25$
B20	4,03	1,55
B40	3,34	1,596
B60	2,87	1,67

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Бондаренко, В. М. Расчётные модели силового сопротивления железобетона / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 472 с.
2. Дзюба, В. А. Исследование пластических свойств арматурных сталей / В. А. Дзюба, Е. В. Журавлева // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 143-145.
3. Дзюба, В. А. Исследование предельных деформаций железобетонных элементов с муфтовыми соединениями арматуры / В. А. Дзюба, И. В. Погорельских, О. А. Сайдамирлова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 88-92.
4. Дзюба, В. А. Применение составной функции диаграммы сжатого бетона для деформационной оценки конструкций / В. А. Дзюба, Ю. С. Глушакова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1 (18). – С. 109-114.
5. Дзюба, В. А. Экспериментальные исследования предельных деформаций гибких сжато-изогнутых колонн / В. А. Дзюба // Проблемы индустриализации строительства общественных зданий: сборник научных трудов. – М.: ЦНИИП реконструкции городов, 1989. – С. 44-56.
6. Дроздов, П. Ф. Прочность каркасных диафрагм / П. Ф. Дроздов, В. А. Дзюба, Л. Л. Паньшин // Бетон и железобетон. – 1985. – № 2. – С. 23-24.
7. Карпенко, Н. И. К построению общей методики расчёта статически неопределимых стержневых железобетонных конструкций на основе метода конечных элементов / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, М. А. Сапожников // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1990. – № 2. – С. 195.
8. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
9. Кодыш, Э. Н. Влияние параметров идеализированных диаграмм деформирования бетона на расчётные значения прочности, трещиностойкости и деформаций изгибаемых и внецентренно сжатых элементов / Э. Н. Кодыш, Н. Н. Трекин, Д. Н. Трекин // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. В 7 т. Т. 1. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2014. – С. 69-75.
10. Мурашкин, Г. В. Применение диаграмм деформирования для расчёта несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов / Г. В. Мурашкин, С. С. Мордовский // Жилищное строительство. – 2013. – № 3. – С. 38-40.
11. Радайкин, О. В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости / О. В. Радайкин // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6 (65). – С. 71-78.
12. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003: свод правил: издание официальное: исполнитель – АО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ имени А. А. Гвоздева / утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр. – М.: Стандартинформ, 2019. – 118 с.
13. Тамразян, А. Г. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках / А. Г. Тамразян, Б. Т. Рашидов // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 6 (80). – С. 14-21.
14. Травуш, В. И. Расчёт параметра живучести рамно-стержневых конструктивных систем / В. И. Травуш, Н. В. Федорова // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2017. – № 1 (45). – С. 21-28.