

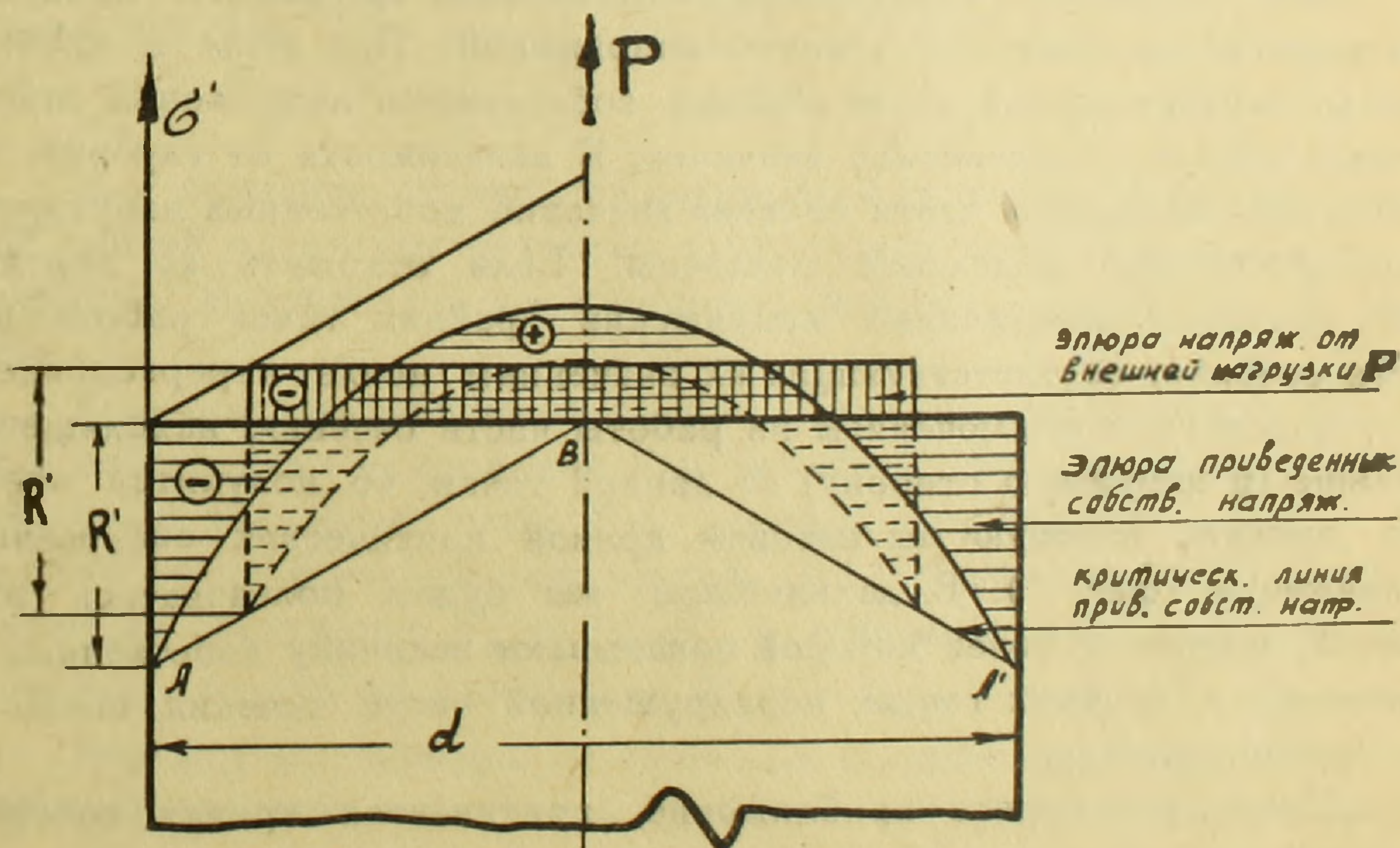
СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Л. Г. Седракян

Об особенностях работы бетона при осевом растяжении и чистом изгибе

(Представлено А. Г. Назаровым 3 X 1951)

Приведем, для упрощения построений, пространственную эпюру собственных напряжений (^{1,2}) в поперечном сечении бетонного бруса, вызванных неравномерным распределением влажности, к плоскостной эпюре (фиг. 1). Для этой цели мы осредняем собственные напряжения в каждом сечении, нормальном к плоскости фиг. 1. Поперечное сечение бруса — прямоугольное.



Фиг. 1.

При растяжении образца в определенных частях наружных слоев сечения напряжения от первых ступеней нагрузки, суммируясь с собственными напряжениями, превышают временное сопротивление бетона растяжению, и эти части сечения выключаются из работы. Это приводит к нарушению равновесного состояния собственных напряжений (сумма растягивающих напряжений станет меньше суммы сжимающих),

а, следовательно, и к их перераспределению. Перераспределение собственных напряжений, в свою очередь, вызывает увеличение растягивающих напряжений неразрушенной части сечения, что приводит к выключению из работы новых точек сечения. Вследствие этого уменьшается площадь работающей части сечения, увеличивается напряжение от внешней нагрузки, снова нарушается равновесие собственных напряжений, что приводит к их новому перераспределению. Описываемый процесс продолжается до тех пор, пока наступит равновесие между собственными напряжениями, напряжениями от внешней нагрузки и внешней нагрузкой. При этом сумма внешних и собственных напряжений в крайних точках неразрушенной части сечения равняется предельному значению напряжения бетона на растяжение (R').

Повышение внешней нагрузки на новую ступень сопровождается повторением описанного процесса. Если величина внешней нагрузки такова, что после перераспределения несущая способность неразрушенной части сечения не увеличивается, а остается постоянной или же уменьшается, то происходит разрыв элемента.

Очевидно, что процесс растяжения должен сопровождаться остаточными деформациями, вызванными перераспределением собственных напряжений, и кажущимся уменьшением модуля деформации, получаемым вследствие уменьшения площади рабочей части сечения.

Как говорилось, выключение части сечения из работы приводит к перераспределению собственных напряжений. При этом в крайних точках неразрушенной части сечения собственные напряжения приобретают вполне определенное значение. В зависимости от глубины выключенной из работы части сечения значение собственных напряжений после их перераспределения различны. Если отложить по вертикалям значения собственных напряжений крайних точек работающей части сечения, соответствующих их значениям после перераспределения, вызванного выключением из работы части сечения, находящегося дальше (в наружную сторону) от данной точки, то получится некоторая кривая, которую мы назовем кривой критических собственных напряжений (фиг. 1). В дальнейшем мы будем пользоваться этой кривой, ординаты точек которой показывают величину собственных напряжений в крайних точках неразрушенной части сечения после их перераспределения.

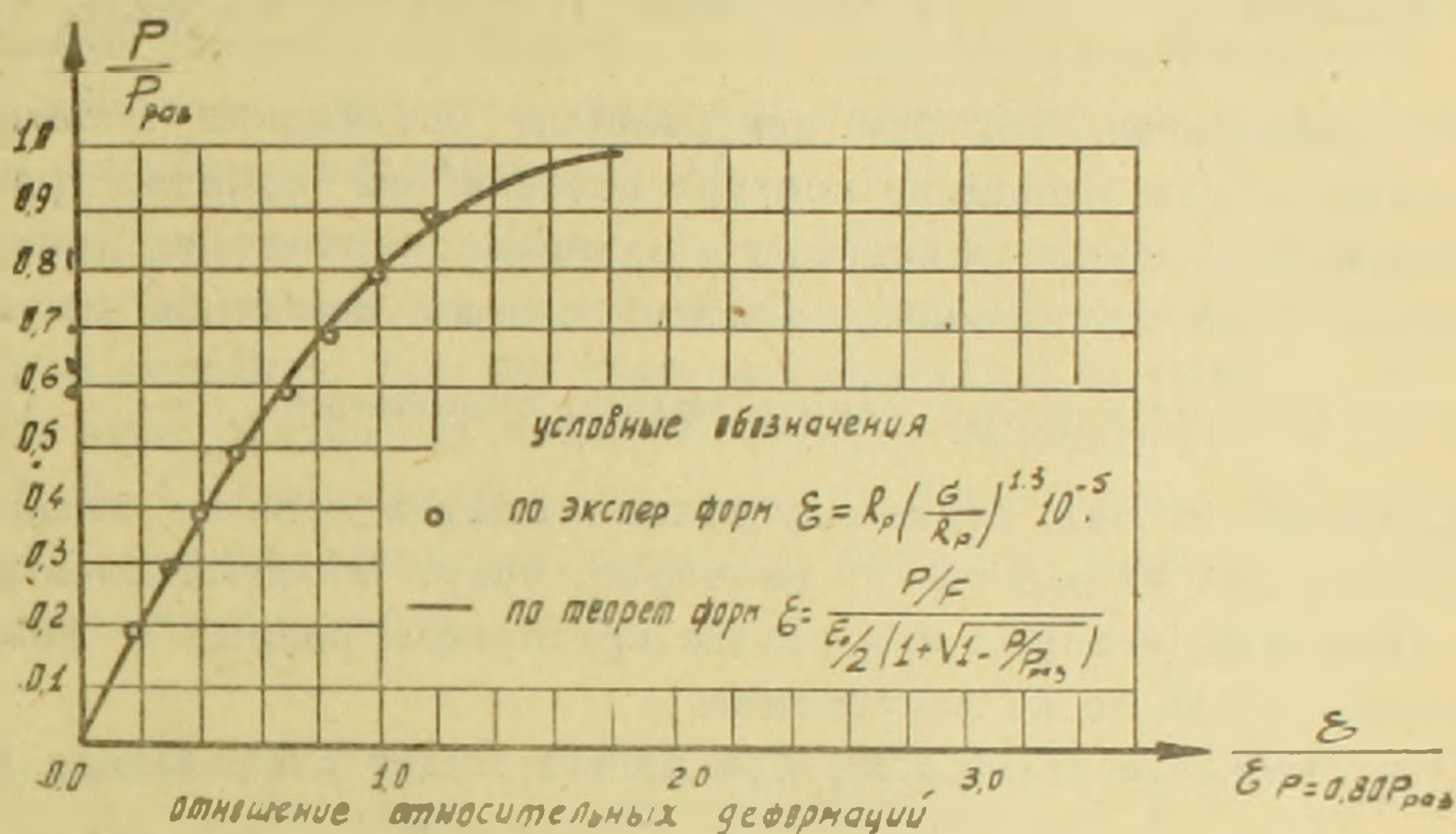
Пусть, как первое приближение, критическая кривая собственных напряжений для элементов обычно применяемых размеров в возрасте одного-двух месяцев будет линия АВ (фиг. 1). В крайних точках сечения значения собственных напряжений на основании работ (2,3,4,5 и др.) приняты равными предельному.

Максимальному значению несущей способности сечения при принятой линии критических собственных напряжений будет соответствовать выключение части сечения глубиной равной $0,25d$ (от краев), при этом напряжение от внешней нагрузки в работающей части сечения равно $0,5 R'$.

Измеренная величина среднего модуля деформации, в предположении, что модуль деформации работающей части сечения постоянен и равен E_0 , в зависимости от степени нагрузки, будет выражаться формулой:

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_0}{2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{P}{P_{\text{раз}}}} \right] \quad (1)$$

Кривая деформации растяжения изображена на графике фиг. 2.



Фиг. 2.

Для проверки сходимости полученной кривой деформации с опытной кривой на фигуре нанесены также точки кривой деформации растяжения, полученные по экспериментальной формуле Г. Д. Цискрели⁽⁵⁾.

Величина разрушающей нагрузки, при принятой линии критических собственных напряжений, $P_{\text{раз}} = 0,25 \cdot R' \cdot F$, т. е. при осевом растяжении используется всего 25% несущей способности сечения, свободного от собственных напряжений. При этом измеренная прочность бетона на растяжение $R'_{\text{ос}} = 0,25 R'$, а действительная (теоретическая) прочность бетона на растяжение $R' \approx 4 \cdot R'_{\text{ос}}$.

Чем меньше значение собственных напряжений, тем больше измеренная величина предельной прочности на растяжение. Очевидно, что собственные напряжения при влажном хранении, (наружные волокна сжимаются, внутренние растягиваются), значительно меньше по сравнению с собственными напряжениями, получаемыми при сухом хранении, и измеренная прочность бетонных образцов, хранившихся во влажных условиях, должна значительно превышать прочность того же бетона на растяжении, но хранившегося в сухих условиях.

Г. Д. Цискрели⁽⁵⁾, изучая в ТНИСГЭИ работу бетона на растяжение, приводит следующие коэффициенты, выражающие влияние условия хранения на величину прочности на растяжение:

- а) водное хранение — 1,10,
- б) влажное хранение — 1,00,
- в) смешанное хранение — 0,70,
- г) сухое хранение — 0,45.

$$\text{Отношение } \frac{R'_{\text{ос (вод. хр)}}}{R'_{\text{ос (сух-хр)}}} = \frac{1,10}{0,45} = 2,45,$$

т. е. отношение $\frac{R'}{R'_{\text{ос}}} \approx 4$ — реально имея в виду, что $R'_{\text{ос (вод. хр)}} < R'$.

Обстоятельство, что при центральном растяжении собственные напряжения на растяжение на контуре сечения мы приняли равными предельному, а, следовательно, при начальных напряжениях допустили, что сечение работает целиком, не могло сильно сказаться на общем поведении сечения и могло менять только отношение $\frac{R'}{R'_{\text{ос}}}$. Однако

при изгибе это не так, поскольку здесь в сжатой зоне не только будут выключаться из работы, а, наоборот, будут включаться в работу новые площадки, которые при усадке претерпели разрыв и вовсе не участвовали в работе на растяжение.

Существование такой зоны при изгибе будет сказываться как на величине отношения $\frac{\epsilon_{\text{сж}}}{\epsilon_{\text{раст}}}$, так и на величине $\frac{R'}{R'_{\text{изг}}}$, а, следовательно, и на отношении $\frac{R'_{\text{изг}}}{R'_{\text{ос}}}$.

Из сказанного очевидно, что кривая критических собственных напряжений при изгибе не будет совпадать с кривой критических собственных напряжений для центрального растяжения.

Допуская, что при изгибе предельное состояние наступает тогда, когда глубина выключенной части в растянутой зоне равна $0,35d$, а напряжение растяжения от внешней нагрузки достигает значения R' , получим:

$$R'_{\text{изг}} = \frac{bd^2(1-0,35)^2 \cdot R'}{6} : \frac{bd^2}{6} = 0,422 \cdot R'.$$

Отношение измеренных прочностей на растяжение при изгибе и осевом растяжении равно $\frac{0,42 R'}{0,25 R'} = 1,70$, что совпадает с экспериментально установленным средним значением этого отношения (^{4,6,7}).

Для построения кривых деформаций сжатия и растяжения в зависимости от величины изгибающего момента, разделим глубину максимального выключенного из работы сечения на n частей

$\left(c' = \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, \frac{n-1}{n}, 1 \right)$ и примем, что кривая критических собственных напряжений прямолинейна.

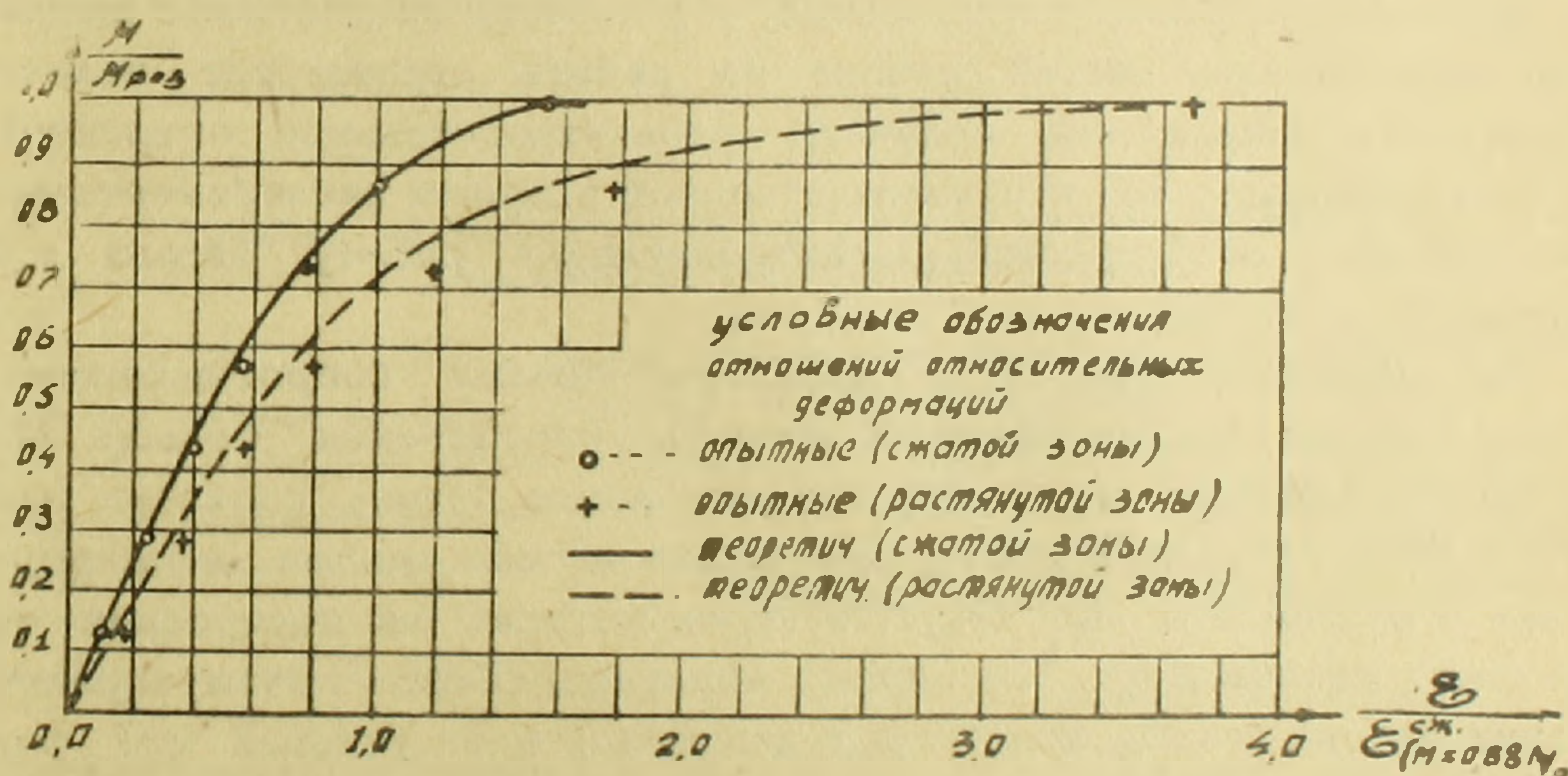
Тогда получим:

$$M_{c'} = \frac{bd^2(1-0,35c')^2c' \cdot R'}{6},$$

$$\epsilon_{(сж.)c'} = \frac{c' R'}{E_0}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{(раст.)c'} = \epsilon_{(сж.)c'} \cdot \frac{1+0,35c'}{1-0,35c'}, \quad \text{где } M_{c'} \text{ — изгибающий момент, вызывающий выключение части сечения в растянутой зоне глубиной равной } c' \cdot 0,35d. \epsilon_{(сж.)c'} \text{ и } \epsilon_{(раст.)c'} \text{ — относительные деформации наиболее сжатых и наиболее растянутых волокон сечения, вызванные изгибающим моментом } M_{c'}.$$

На фиг. 3 построены кривые деформации наиболее сжатых и наиболее растянутых волокон сечения балки в зависимости от степени изгибающего момента. Там же нанесены характерные результаты испытания на изгиб одной из бетонных балок, проведенного В. Г. Лукиным и Я. В. Столяровым⁽⁴⁾. При этом в обоих случаях деформации сжатой зоны, соответствующие значению момента равному $0,88 M_{раз}$, приняты равными единице.



Фиг. 3.

Незначительное отступление теоретической кривой деформации растяжения от экспериментальной является следствием наличия в растянутой зоне, еще до начала испытания, неучтенных нами трещин (образец испытывался в возрасте 90 дней). Это легко усматривается из отношения деформации растянутой зоны к сжатой при начальных ступенях нагрузки.

При принятых критических линиях собственных напряжений предельная растяжимость, соответствующая осевому растяжению, равна $\frac{0,5 R'}{E_0}$, а при изгибе величина его, доступная измерению, равна

$$\frac{R'}{E_0} \cdot \frac{1+0,35}{1-0,35} = \frac{2,08 R'}{E_0}.$$

Следовательно, хотя предельная растяжимость фактически работающих частей сечений остается постоянной (равной $\frac{R'}{E_0}$), измеренная меняется, и, в частности, при изгибе $\varepsilon_{(раст.) пр'}^{из} = \frac{2,08 R'}{E_0} : \frac{0,5 R'}{E_0} \approx \approx 4 \cdot \varepsilon_{ос. пр.}$, что также бесспорно подтверждается многочисленными опытами. При этом раскрытие трещин в растянутой зоне перед разрушением может достигь 10—40 микрон.

Необходимо упомянуть, что полученные величины характеристик бетона не являются окончательными и единственными. Например, достаточно учесть возможный разрыв на определенной глубине сечения до воздействия нагрузки, или, наоборот, принять во внимание, что при нулевых нагрузках значение крайних напряжений меньше предельного, чтобы прийти к другим линиям критических собственных напряжений и получить для характеристик бетона значения, отличные от полученных выше.

Итак принимаем, что материал имеет определенную прочность на растяжение и модули деформации как на растяжение, так и на сжатие постоянны и равны между собой, и учитывая постепенное выключение определенных частей сечения из работы вследствие наличия собственных напряжений, получаем удовлетворительное объяснение как с качественной, так и с количественной стороны экспериментально установленных особенностей, характеризующих работу бетона при растяжении и изгибе.

В частности становится понятным—почему сопротивляемость бетона в балке, при ее обычных методах определения, больше чем при осевом растяжении, почему приписываемое бетону свойство пластической растяжимости кажущееся, и при изгибе кривые деформации сжатия и растяжения при существующих методах их построения существенно различаются. Становится понятным также—почему характеристики бетона сильно меняются в зависимости от условий его формирования, от возраста и т. д.

Правда, кроме описанного закономерного выключения из работы элементарных площадок, в сечении происходят также элементарные выключения, вызванные наличием в сечении собственных напряжений второго рода. Но учет их не может существенно сказаться на затронутых выше характеристиках бетона. Они могут несколько сдвинуть кривые деформации в ту или другую сторону или менять измеренные величины прочностей в сторону их повышения или понижения. Но как первые, так и вторые не являются принципиальными и носят чисто уточняющий характер.

Влияние на деформацию собственных напряжений второго рода можно учесть, используя зависимость между величиной среднего модуля деформации и нагрузкой, установленную для сжатых элементов ⁽¹⁾ $E_{ср} = E_0 \left(1 - A \frac{P}{P_{раз.}} \right)$.

Например, при изгибе, заменив отношение $\frac{P}{P_{раз}}$ отношением

$\frac{\sigma_{сж. край}}{\sigma_{сж. край. пр}}$ и учитывая, что фибровые напряжения сжатия не доходят

до их предельного значения, можно определить значения произведе-

ния $A \frac{\sigma_{из. край. пр}}{\sigma_{сж. край. пр}} = A'$, соответствующего максимальному фибровому

напряжению при изгибе и пользоваться уравнением деформации сжа-

тия. В частности при $R' \approx 4 \cdot R'_{ос}$

$$A' \approx 0,65 \frac{4 \cdot 0,1 \cdot 1,25 \cdot R_{пр}}{(1 + 2) R_{пр}} \approx 0,30 \div 0,15,$$

и для неразрушенной части сечения изгибаемого элемента

$$E_{ср} = E_0 \left(1 - A' \cdot \frac{\sigma_{из. край}}{\sigma_{из. край. пр}} \right). \quad (3)$$

Институт стройматериалов и сооружений

Академии наук Армянской ССР

L. Գ. ՍԵՂՐԱԿՅԱՆ

Ձգման եւ մաքուր ծռման ժամանակ բետոնի առանձնահատկությունների մասին

Հոգւածուժ բետոնի աշխատանքը ձգման եւ մաքուր ծռման ուսումնասիրելիս, ի նկատի է առնված բետոնում առաջացող սեփական լարումները:

Ցույց է տրված, որ կտրվածքի ձգմանը ղուգակցում է նրա արտաքին ձգված շերտերի աստիճանաբար աշխատանքից դուրս գալը, որը բերում է մնացորդային դեֆորմացիայի առաջացման՝ սեփական լարումների վերաբաշխման հետեանքով եւ դեֆորմացիայի գործակցի մեծության թվացող փոքրացման, որը ստացվում է կտրվածքի աշխատող մակերեսի փոքրացման շնորհիվ:

Ցույց է տրված, որ բետոնի կենտրոնական ձգման փորձարկումից որոշվող դիմադրությունը զգալի չափով փոքր է նրա իրական ձգման դիմադրությունից (հոգւածուժ բերված օրինակում մոտ 4 անգամ):

Նյութին վերագրելով որոշակի դիմադրողականություն ձգող ուժերին եւ դեֆորմացիայի գործակցի նույն մեծություն՝ ինչպես սեղման, այնպես էլ ձգման ժամանակ, ու ի նկատի ունենալով սեփական լարումների առկայության պատճառով ձգված շերտերի աստիճանաբար աշխատանքից դուրս գալը, տրվում են միանգամայն բավարար բացատրություններ ինչպես որակական, այնպես էլ բանական, փորձերով հաստատված՝ բետոնի աշխատանքը ձգման եւ ծռման ժամանակ բնորոշող առանձնահատկությունների համար:

Հասկանալի էն դառնում, թե ինչու բետոնի դիմադրությունը ձգման, որը ստացվում է հեծանի փորձարկումից, պետք է լինի ավելի մեծ, քան կենտրոնական ձգման դեպքում, թե ինչու բետոնին վերագրվող պլաստիկ երկարացման հատկությունը ծռման ժամանակ թվացող է եւ ինչու են զգալի կերպով տարբերվում սեղմված եւ ձգված եզրերի համար հայտնի մեթոդներով կառուցված դեֆորմացիայի կորերը: Հասկանալի են դառնում թե ինչու բետոնի հատկությունները զգալիորեն կախված են՝ նրա, որպես կրող նյութի ձեւփոխման պայմաններից, հասակից եւ այլն:

Ծովող էլիմենտի կտրվածքի աշխատանքին մասնակցող մասի դեֆորմացիոն հատկությունների վրա երկրորդ կարգի սեփական լարումների ազդեցությունը ի նկատի է առնված (3) բանաձեւի օգնությամբ:

ЛИТЕРАТУРА--ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Л. Г. Седракян, ДАН Арм. ССР т. XIV, № 1, 1951 ² А. В. Белов, Опыт математической теории усадки бетона, Известия ВНИИГ, т. 35, 1948. ³ Ю. А. Нилендер, Поверхностная прочность бетона и связь ее с появлением трещин, Труды конференции по коррозии бетона, 1937. ⁴ Я. В. Столяров, Введение в теорию железобетона, 1941. ⁵ Г. Д. Цискрели, Вопросы расчета железобетонных конструкций на трещинообразование, Сборник статей, „Бетон и железобетонные конструкции“, 1948. ⁶ Б. Г. Скрамтаев, Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси, 1936. ⁷ В. П. Манжаловский, Исследование изгиба бетонных балок, 1938.