

**АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДИАГРАММ  
«НАПРЯЖЕНИЕ-ДЕФОРМАЦИЯ» РАСТЯНУТОГО-БЕТОНА**

Курган П.Г., Шеховцов И.В., Курган С.П., (ОГАСА, г.Одесса)

Приведены результаты экспериментальных исследований деформирования различных видов бетона при кратковременном осевом растяжении. Выполнен анализ имеющихся в литературе основных функциональных зависимостей, применяемых для аппроксимации диаграмм «напряжения-деформации» растянутого бетона.

Для решения прикладных задач необходима надежная аппроксимация экспериментальных кривых  $\sigma_{bt} - \epsilon_{bt}$  растянутого бетона аналитическими зависимостями. Общая форма зависимости  $\epsilon_{bt} f(\sigma_{bt})$  в бетоне, как известно, сложна. Растянутый бетон нельзя рассматривать как сплошное однородное тело, подчиняющееся законам упруго-пластичного деформирования. Это материал неоднородный с нарушенной сплошностью и может работать в «надтреснутом» состоянии (теория равновесных трещин Гриффитса, Ирвина, Орована). Для таких материалов понятие «предельная растяжимость», которым обычно пользуются в теории сопротивления бетона, является несколько условным. Механизм деформирования и разрушения растянутого бетона – это процесс развития деструкций (усадочных и силовых). Неоднородность и микротрещинообразование в растянутом бетоне обуславливают стохастическую изменчивость его прочности и деформаций. Известно, что зависимость  $\epsilon_{bt} f(\sigma_{bt})$  при растяжении зависит от вида напряженного состояния, режима деформирования образцов (скорости деформаций  $V_\epsilon$  и скорости нагрузки  $V_\sigma$ ), при прочих равных условиях она зависит от возраста, вида, составов, класса бетонов и др. Учесть эти факторы в явном виде в эмпирических формулах сложно. Поэтому для инженерных расчетов используют приближенные зависимости в виде сравнительно простых выражений, аппроксимирующих экспериментальные диаграммы  $\sigma_{bt} - \epsilon_{bt}$ . К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных о работе бетона при центральном сжатии, и предложены различные варианты математического описания связи между  $\sigma_b$  и  $\epsilon_b$ . Применительно к осевому растяжению таких исследований выполнено недостаточно. Однако, если учесть

мнение многих исследователей, что между диаграммами сжатия и растяжения бетона существует подобие, то для описания связи  $\varepsilon_{bt} f(\sigma_{bt})$  можно использовать зависимости, предложенные для сжатия. Наиболее простыми видами аппроксимации экспериментальных диаграмм являются: диаграммы жесткопластического тела, диаграммы Прандтля, диаграммы с линейным упрочнением, часто встречаются простые выражения в виде степенного закона, уравнения квадратной и кубической параболы и др. Для описания диаграмм  $\sigma$ - $\varepsilon$  используются также более сложные выражения: в виде полинома ( $\sigma = A\varepsilon^m + B$ ), проходящего через заданные точки или построенного по методу Ньютона; аппроксимация в виде экспоненциальной функции ( $\sigma = Ae^{a\varepsilon} + B$ ); синусоиды  $\sigma = A \sin B\varepsilon$ ; гиперболической зависимости  $\varepsilon = \operatorname{csh} \sigma / A$  и др. Достоинства и недостатки этих видов аппроксимирующих функций общеизвестны. Простые выражения дают более или менее хорошее совпадение с опытом на отдельных участках диаграммы  $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ , но плохо описывают кривые для других уровней напряжений. Сложные зависимости с достаточной точностью описывают фактические диаграммы сжатия, однако использование их для описания диаграммы растяжения приводит к громоздким выражениям, ограничивающим возможности их практического применения. Целесообразность использования приведенных выше функций для аппроксимации диаграмм  $\sigma_{bt} f(\varepsilon_{bt})$  зависит от конкретных условий решаемых задач.

В рекомендациях ЕКБ, например, приведена зависимость, которую для случая растяжения можно представить в виде

$$\frac{\sigma_{bt}}{\bar{\sigma}_{bt}} = \frac{n \varepsilon_{bt} / \bar{\varepsilon}_{bt} - (\varepsilon_{bt} / \bar{\varepsilon}_{bt})^2}{1 + (n - 2) \varepsilon_{bt} / \bar{\varepsilon}_{bt}}, \quad (1)$$

где  $n$  - опытный коэффициент, значение которого для растяжения не раскрыто;  $\bar{\sigma}_{bt}$  и  $\bar{\varepsilon}_{bt}$  - прочность и предельная деформация бетона при осевом растяжении.

В исследованиях [2] зависимость  $\sigma_{bt} f(\varepsilon_{bt})$  имеет вид

$$\frac{\sigma_{bt}}{\bar{\sigma}_{bt}} = n_1 \frac{\varepsilon_{bt}}{\bar{\varepsilon}_{bt}} - (n_1 - 1) \left( \frac{\varepsilon_{bt}}{\bar{\varepsilon}_{bt}} \right)^{n_1}, \quad (2)$$

где  $n_1 = E_{bt} \bar{\varepsilon}_{bt} / \bar{\sigma}_{bt}$ . По опытным данным  $n = 1,7$ .

Аппроксимация восходящей ветви диаграмм растянутого бетона в виде функций (1), (2) не удовлетворяет некоторым феноменологическим закономерностям деформирования бетона.

В работе [3] при осевом растяжении полная диаграмма деформирования бетона представлена в виде:

$$\varepsilon_{bt} = \sigma_{bt} / E_{bt} \nu_{bt}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{bt}$ ,  $\sigma_{bt}$  и  $E_{bt}$  - соответственно, деформации, напряжения и модуль упругости бетона; коэффициент изменения секущего модуля  $\nu_{bt}$  в зависимости от уровня нагрузки  $\eta = \sigma_{bt} / R_t$  описывается зависимостью:

$$\nu_{bt} = \bar{\nu}_{bt} \pm (\nu_0 - \bar{\nu}_{bt}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}. \quad (4)$$

В формуле (4) коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы принимает значение  $\bar{\nu}_{bt} = 0,6(1 + 0,01 R_t)$ . Для восходящей ветви диаграммы  $\nu_0 = 1$ ,  $\omega_1 = 2 - 2,5 \bar{\nu}_{bt}$ , нисходящей -  $\nu_0 = 2,05 \bar{\nu}_{bt}$ ;  $\omega_1 = 1,95 \bar{\nu}_{bt} - 0,14$ . Параметры  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , характеризующие кривизну диаграммы, связаны зависимостью  $\omega_2 = 1 - \omega_1$ .

В исследованиях В.Е. Ящука [1], учитывая феноменологические требования к кривой  $\sigma_{bt} f(\varepsilon_{bt})$  (при  $\sigma_{bt} = 0$ ,  $d\sigma_{bt} / d\varepsilon_{bt} = E_0$  и при  $\sigma_{bt} = \bar{\sigma}_{bt}$ ,  $d\sigma_{bt} / d\varepsilon_{bt} = 0$ ), уравнение касательного модуля деформаций при кратковременном стандартном растяжении (при  $\nu_{bt} = const$ ) предложено в виде

$$E_k = \frac{d\sigma_{bt}}{d\varepsilon_{bt}} = E_{bt} \left(1 - \frac{\sigma_{bt}}{\bar{\sigma}_{bt}}\right)^{1 - \bar{\nu}_{bt}}. \quad (5)$$

При решении дифференциального уравнения (5) получены удобные для практического пользования зависимости

$$\sigma_{bt} = \bar{\sigma}_{bt} \left[ 1 - \left( 1 - \varepsilon_{bt} / \bar{\varepsilon}_{bt} \right)^{\frac{1}{\bar{\nu}_{bt}}} \right], \quad (6)$$

$$\varepsilon_{bt} = \bar{\varepsilon}_{bt} \left[ 1 - \left( 1 - \sigma_{bt} / \bar{\sigma}_{bt} \right)^{\bar{\nu}_{bt}} \right]. \quad (7)$$

$\bar{\nu}_{bt} = \bar{\sigma}_{bt} / \bar{\varepsilon}_{bt} E_{bt}$  - предельный коэффициент упругости бетона при осевом растяжении

Выражения (6),(7) отвечают загрузению бетона с  $V_{obt} = \text{const}$  и, следовательно, не описывают нисходящую ветвь диаграммы  $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$ .

Показанные на рис.1 экспериментальные диаграммы бетона при осевом растяжении аппроксимированы функцией (6). Опытные диаграммы получены при кратковременном ступенчатом нагружении по стандартной методике образцов-цилиндров, изготовленных из бетонов различной по макроструктуре и упруго-вязким свойствам (обычного тяжелого, мелкозернистого и керамзитобетона для широкого диапазона прочностей). Каждая выборка исследованных видов бетона содержала от 6 до 24 образцов, их общее количество - 144. Плоскими линиями обозначены теоретические кривые. Проверка адекватности выражения (6) по критерию Фишера для всех исследованных видов и классов бетона показала, что оно достоверно при 5% уровне значимости и дает хорошее соответствие опытных и теоретических результатов для всех уровней напряжений.

**Вывод.** Проведенный сравнительный анализ соответствия различных функций  $\varepsilon_{bt} f(\sigma_{bt})$  опытными данным свидетельствует о большей достоверности уравнений (6),(7) и позволяет применять их в расчетах железобетонных конструкций.

#### Литература

1. Ящук В.Е. К описанию диаграмм сжатия и разгрузки бетона. - Изв. вузов "Строительство и архитектура", 1982, №3
2. Караваев А.В. Определение предельной растяжимости бетона изгибаемых неармированных элементов. - Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Т.116. - л: Энергия, 1977, с.7-14.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. - М: Строиздат, 1996, 446 с.

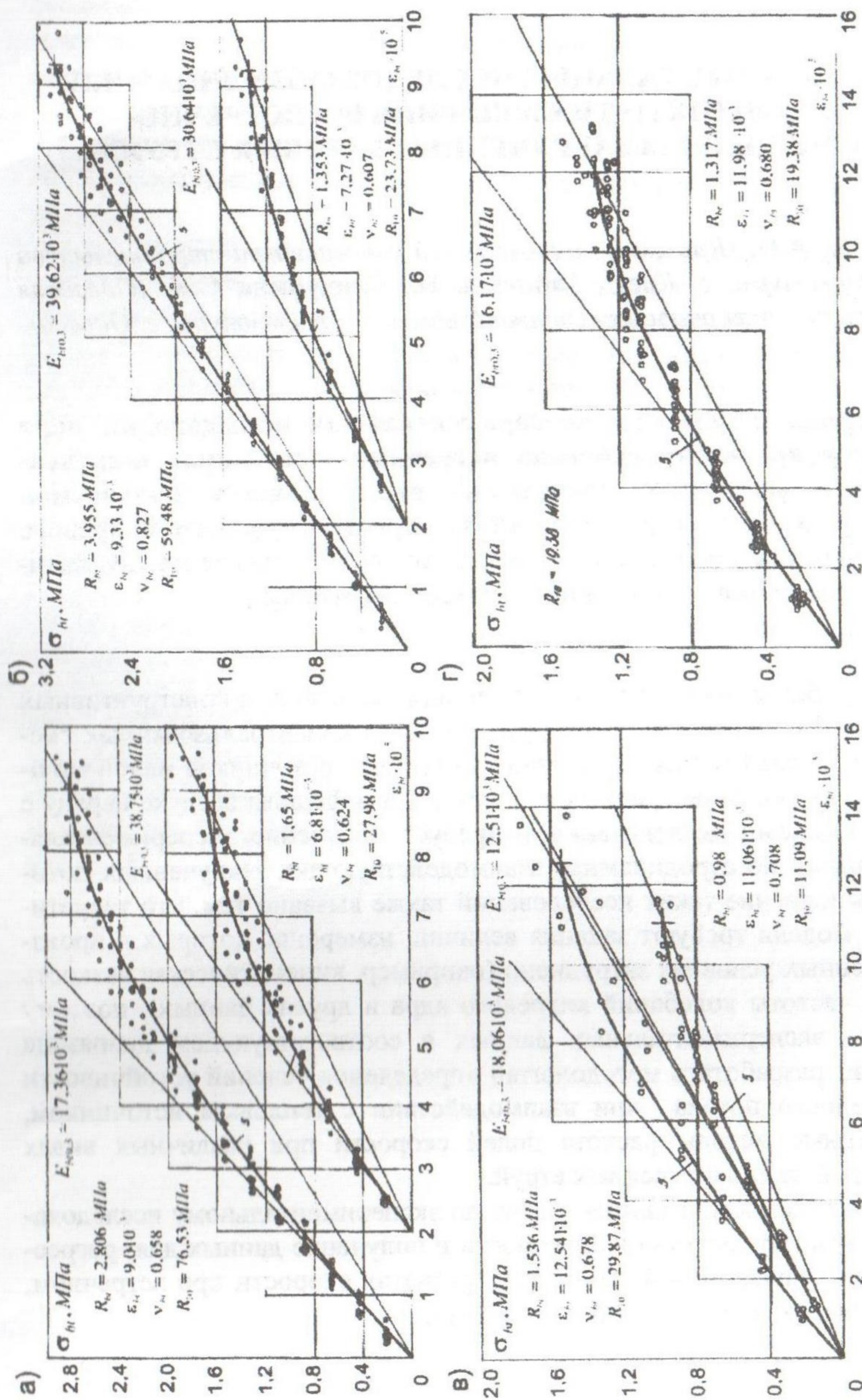


Рис. 1 Диаграммы  $\sigma_{\text{н}}$  -  $\epsilon_{\text{н}}$  при осевом растяжении: а- тяжелого бетона; б- мелкозернистого бетона; в, г- керамзитобетона