

Определение остаточного ресурса строительных конструкций АЭС

Николаев В.Б.,
Климов Е.А.

Период времени, за который определяющий параметр технического состояния строительной конструкции достигает предельно-допустимого значения (критерия), называется **остаточным ресурсом**.

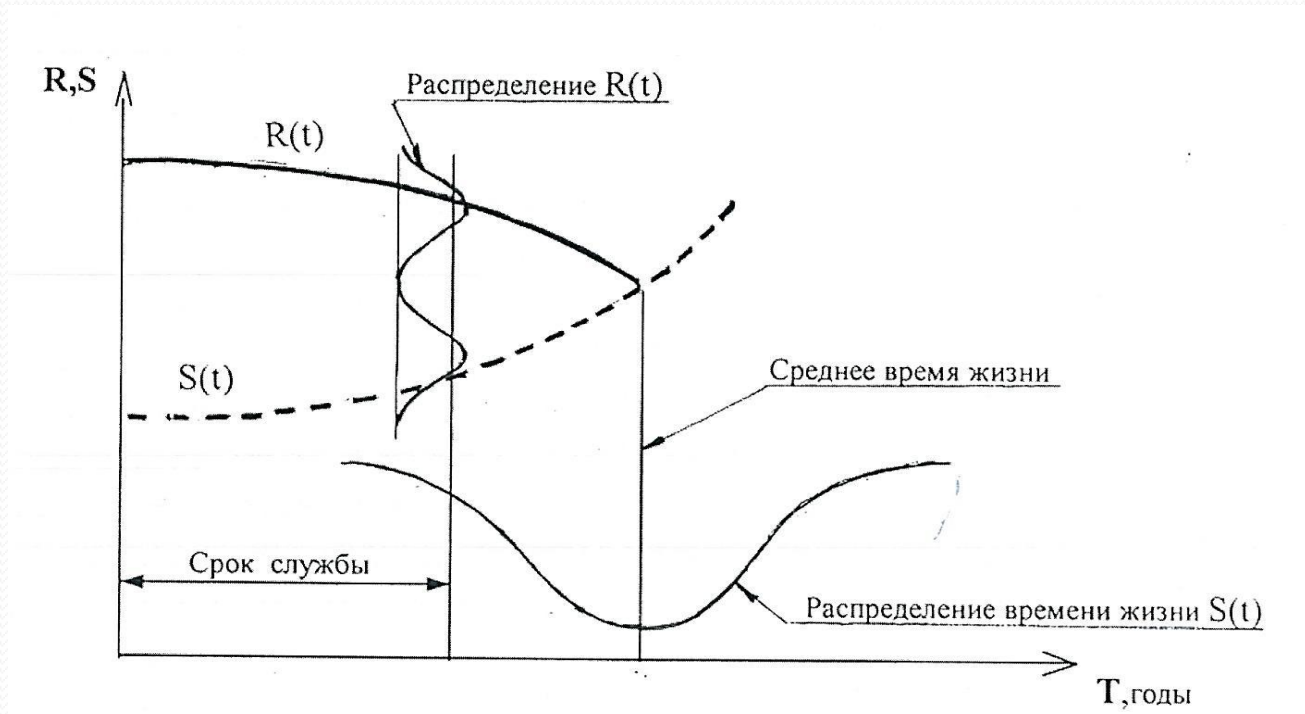


Рис. 1 Изменение во времени функции, характеризующей способность конструкции сопротивляться нагрузке ($R(t)$) и нагрузочная функция ($S(t)$)

Методика определения остаточного ресурса строительных конструкций АЭС

Существует 2 методики определения остаточного ресурса:

- Методика расчета ресурса по анализу прочности бетона

Определение ресурса по данному методу возможно при выполнении двух условий:

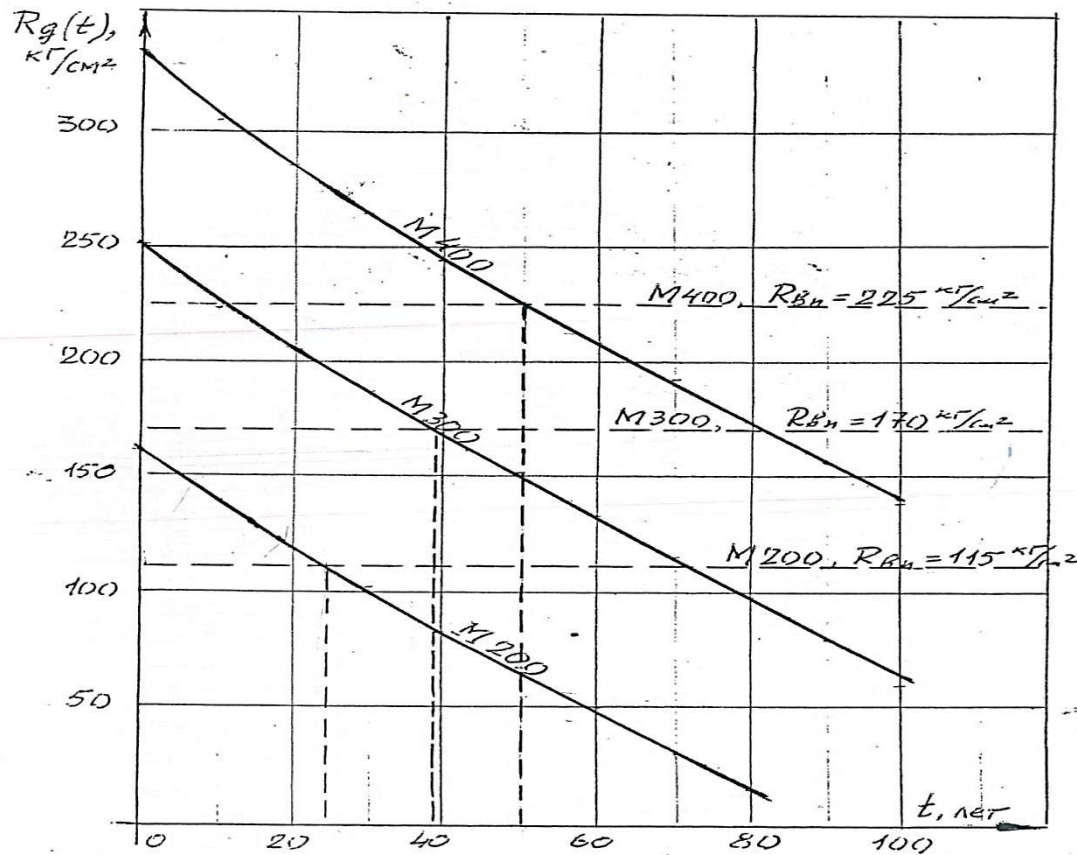
а) нагрузки и воздействия не изменились за предшествующий период эксплуатации. Проектная прочность бетона соответствует этим нагрузкам;

б) прочность бетона при обследовании превышает проектную прочность бетона.

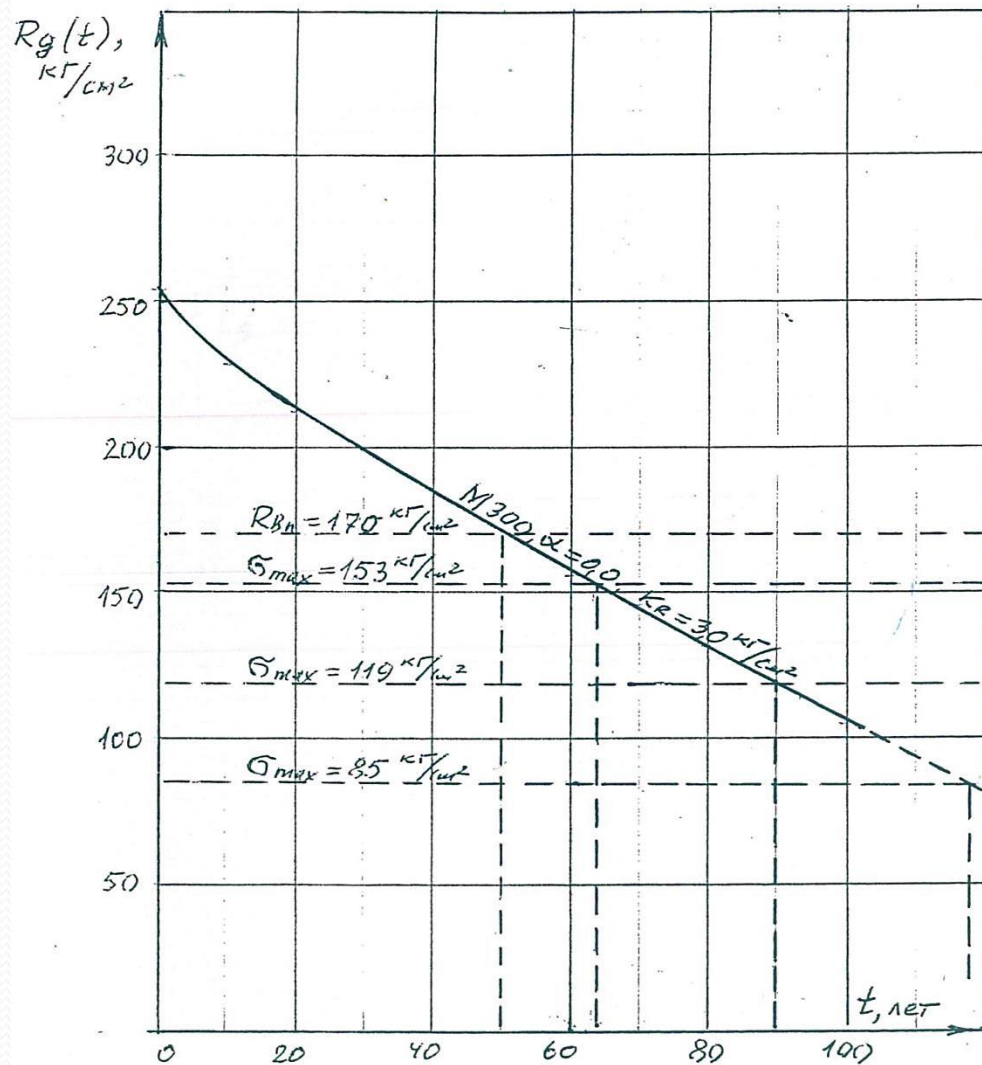
- Методика расчета ресурса по изменению напряженного состояния во времени

Определение ресурса по данному методу возможно при прочности бетона ниже проектной.

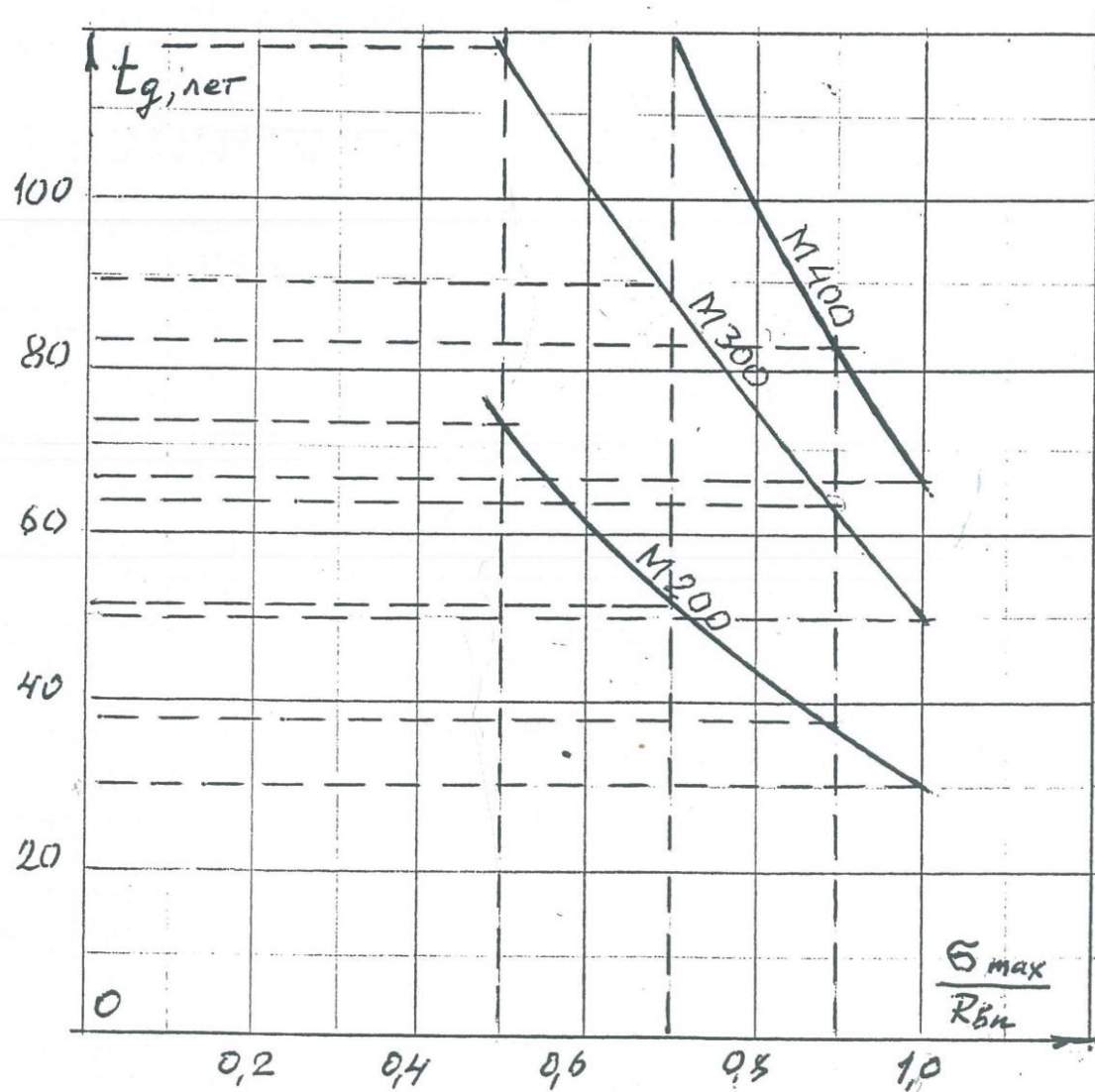
- Во ВНИИГ им. Веденеева были проведены достаточно крупные экспериментальные работы по прямому определению длительной прочности бетона.



На рис 1 представлен график $R(t) = f(t)$, на котором пунктиром отмечены уровни напряжений, соответствующие нормативному сопротивлению бетона сжатию в марочном возрасте. Точки пересечения пунктирных прямых с графиком $R(t) = f(t)$ позволяют определить возраст бетона, при котором он удовлетворяет требованиям нормативных документов по прочности.



На рис 2 для бетона М300 построен график $R_d(t) = f(t)$, на котором пунктиром отмечены уровни напряжений, соответствующие R_{bn} , а так же при $\sigma_{max} = 0,9R_{bn}, 0,7R_{bn}, 0,5R_{bn}$. Точки пересечения пунктирных линий с кривой $R_d(t) = f(t)$ позволяют определить максимальный возраст бетона, до которого конструкция при заданном уровне эксплуатационных напряжений удовлетворяет требованиям по прочности, принятым при ее проектировании.



На рис. 3 представлены графики $t_d = f\left(\frac{\sigma_{max}}{R_{bn}}\right)$, построенные на основании графиков $R(t) = f(t)$. Анализ графиков показывает, что при одном и том же уровне напряжений в конструкции срок ее пригодности существенно возрастает с увеличением марки бетона.

Методика расчета ресурса по анализу прочности бетона

В результате анализа экспериментальных данных была получена следующая зависимость $R(t) = f(t)$:

$$R(t) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \lg t) - k_R \cdot (t - t_0), \quad (1)$$

- где R_0 – прочность бетона в момент времени t_0 ;
- t_0 и t - возраст бетона в годах;
- α - коэффициент, характеризующий интенсивность прироста прочности бетона со временем и зависящий от состава бетонной смеси, условий хранения образцов и др. факторов.
- k_R - коэффициент интенсивности снижения прочности бетона вследствие деструктивных процессов.

Для определения ресурса ЖБК по анализу прочности бетона необходимо рассматривать совместно графики изменения (снижения) прочности бетона во времени и проектной прочности бетона. Пересечение двух указанных графиков соответствует остаточному ресурсу (времени достижения ПС).



- 1 - проектная прочность бетона конструкции;
- 2 - теоретическая кривая набора прочности бетона в условиях нормальной влажности;
- 3 - прочность бетона, соответствующая моменту проведения обследования;
- 4 - прогнозируемое изменение прочности бетона в реальных условиях.

k_R - коэффициент интенсивности снижения прочности бетона вследствие деструктивных процессов:

- переменное замораживание и оттаивание;
- воздействие повышенных температур;
- образование микротрещин при превышении порога микротрещинообразования $\sigma_b > 0,4 \cdot R_b$.

Значения коэффициента k_R для каждого конкретного сооружения определяются на основании анализа результатов экспериментальных исследований, в том числе результатов его обследования и определения фактической его прочности в возрасте (путем испытания кернов или неразрушающими методами). В общем случае значение коэффициента k_R определяется по формуле:

$$k_R = \frac{R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \lg t) - R(t)}{(t - t_0)} \quad (2)$$

В случае, если при обследовании интенсивность снижения прочности не выявлена, значения k_R допускается принимать следующими:

- $k_R = 4$ при переменном замораживании и оттаивании и воздействия водной среды или воздействия температуры 120 – 200 °С (до 30 лет);
- $k_R = 1,5$ при воздействии температуры, не превышающей 120 °С при $t > 30$ лет.

При умеренных параметрах, определяющих изменение прочности со временем (; кг/см²/год), прочность бетона не снижается по сравнению с первоначальной марочной прочностью.

При действии в бетоне уровня напряжений, меньших расчетных сопротивлений, ресурс бетона существенно увеличивается и может быть приближенно спрогнозирован с использованием линейной зависимости:

$$k_R = k_0 \cdot \frac{\sigma_b}{R_s}, \quad (3)$$

где k_0 принимается равным 4 кг/см² · год

В результате значение коэффициента k_R принимается по максимальному по формулам (2) и (3).

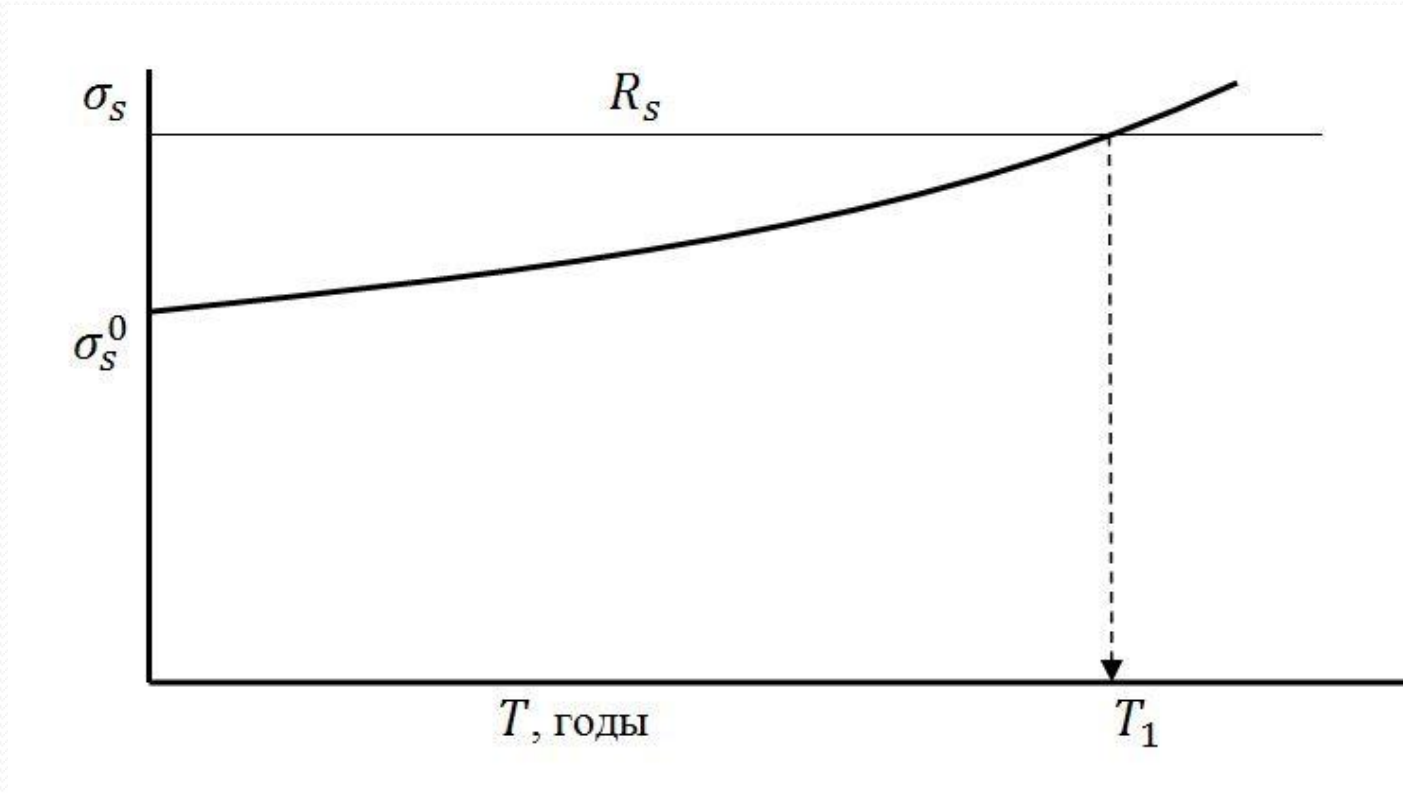
Определение остаточного ресурса по изменению напряженного состояния во времени

Остаточный ресурс конструкции определяется в результате многопараметрического анализа в котором рассматриваются:

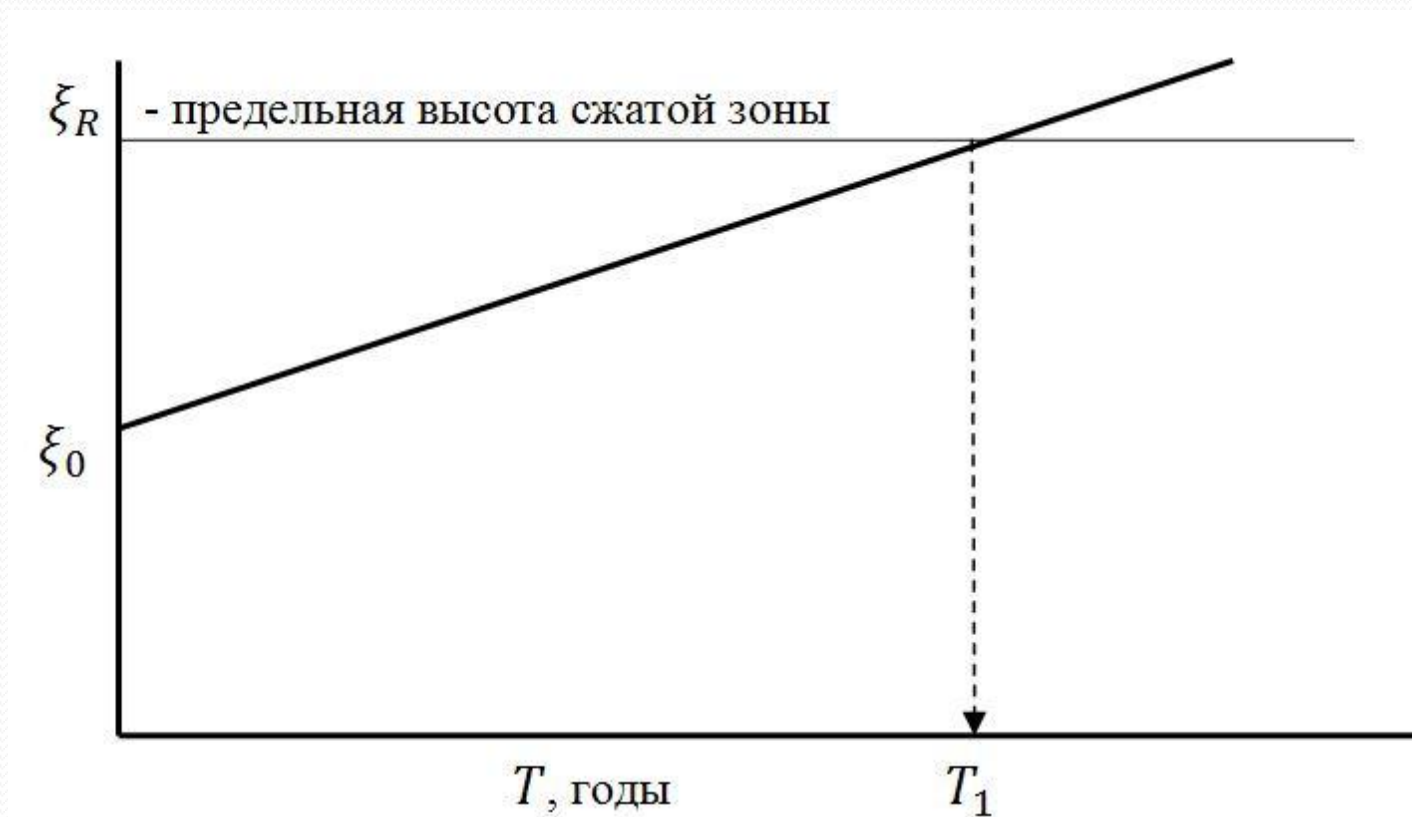
- Растянутая зона (параметр – напряжения в продольной арматуре σ_s)
- Изменение напряжений в арматуре во времени в зависимости от снижения прочности бетона (рисунок 8.1) от действия изгибающих моментов и нормальных сил;
- Сжатая зона (параметр – относительная высота сжатой зоны ξ)
Изменение относительной высоты сжатой зоны во времени в зависимости от снижения прочности бетона;
- Действие поперечных сил (параметр – поперечная сила, воспринимаемая бетоном Q_b , напряжения в поперечной арматуре σ_{sw})

Срок службы сооружения устанавливается по наименьшему из перечисленных параметров.

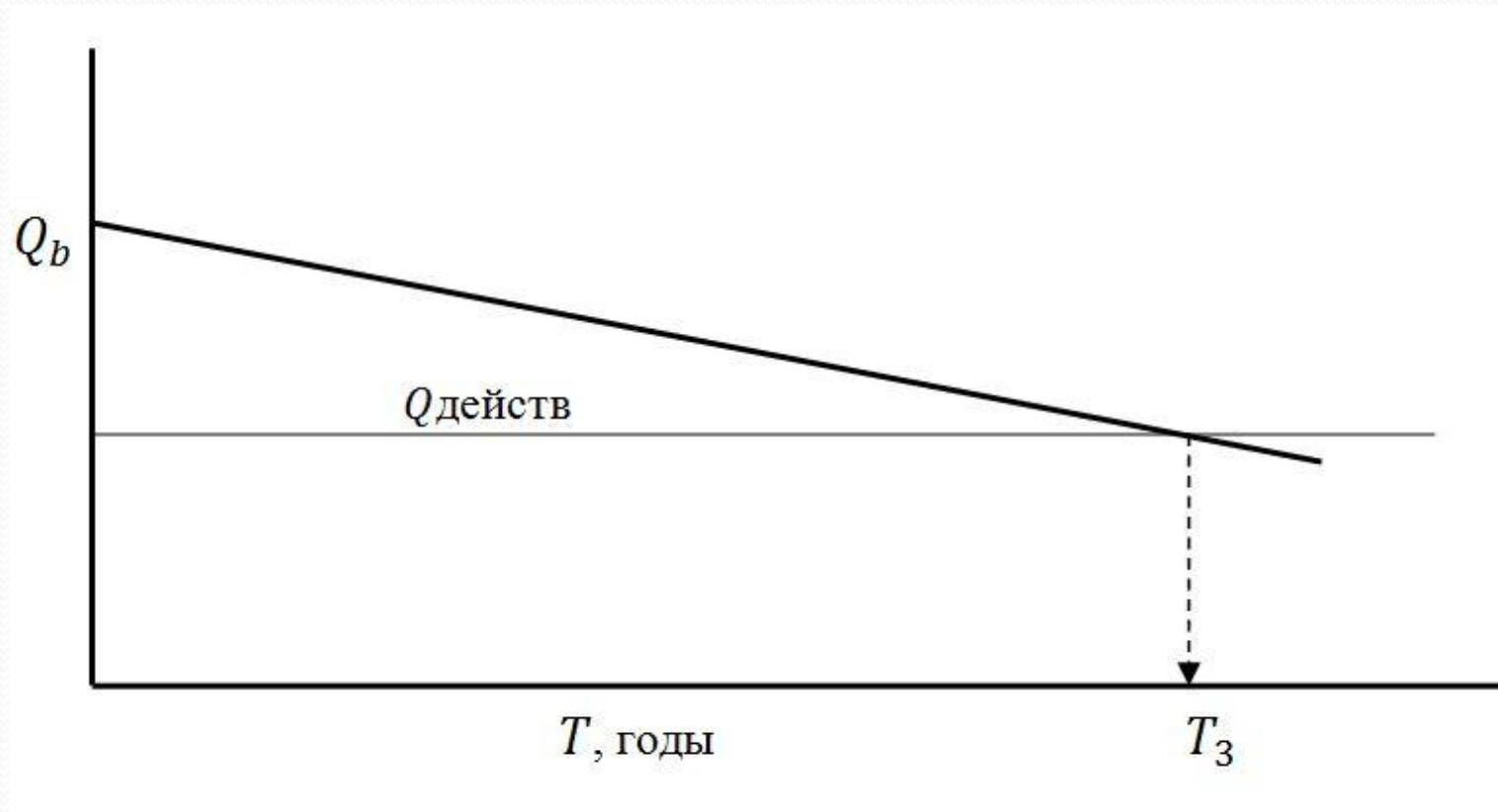
Параметр – напряжения в продольной арматуре σ_s



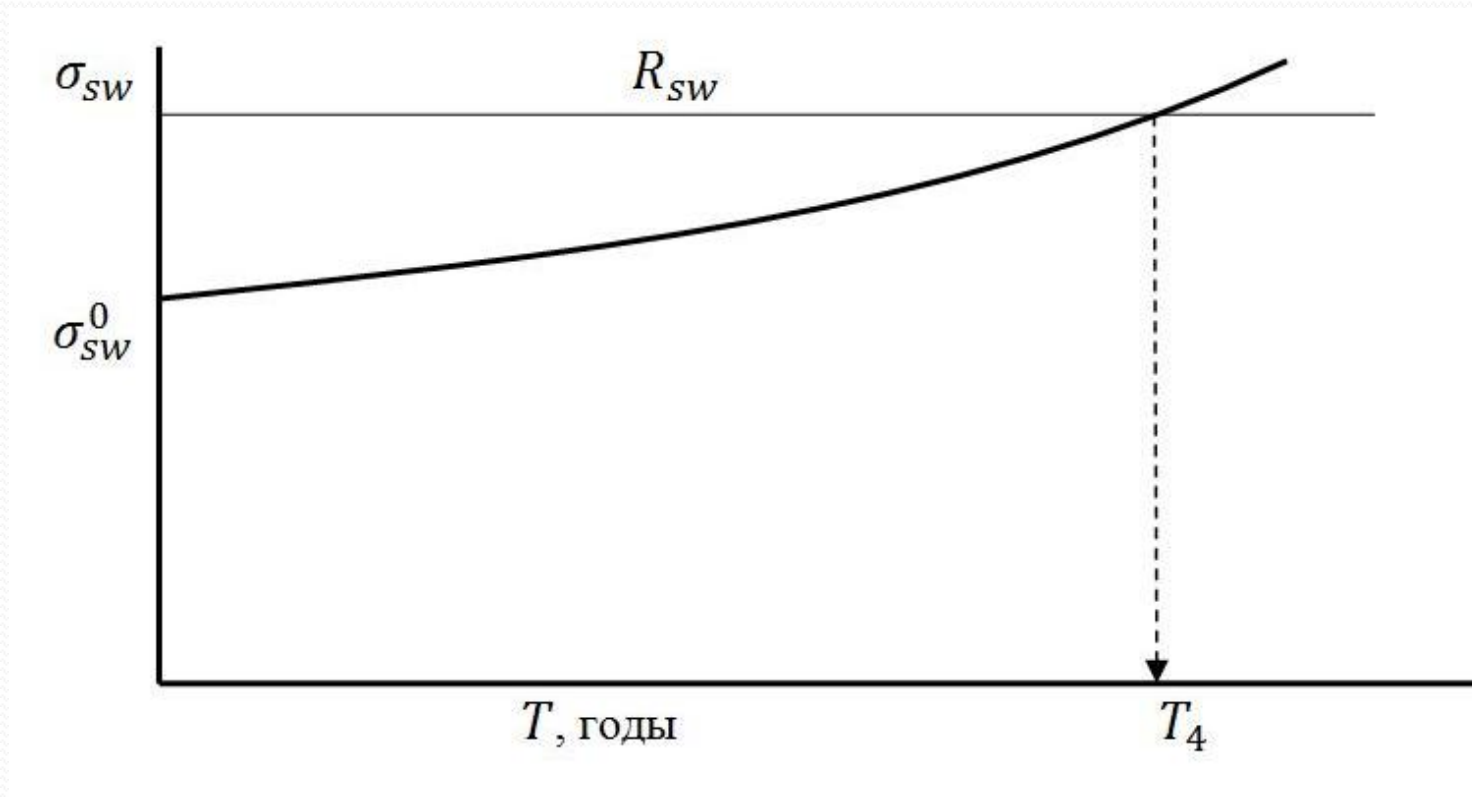
Параметр – относительная высота сжатой зоны ξ



Параметр – поперечная сила Q

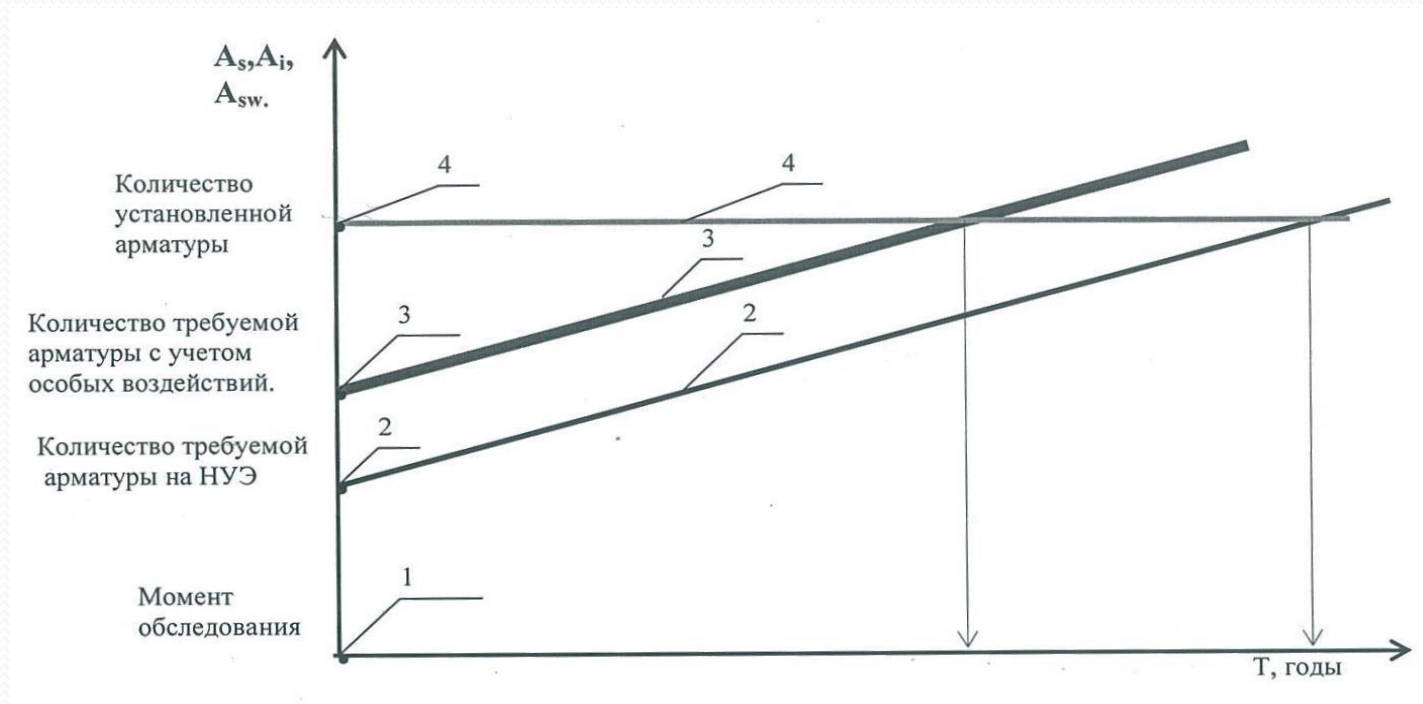


Параметр – напряжения в поперечной арматуре σ_{sw}



Определение остаточного ресурса по количеству установленной арматуры

- На первом этапе определяют требуемую арматуру на НУЭ в момент обследования. Количество арматуры определяется по результатам прочностных расчетов и подтверждается прямыми измерениями напряженного состояния в натурном сооружении.
- На втором этапе производят расчеты с заданным интервалом времени с учетом понижения прочности бетона во времени.



Оценка остаточного ресурса с учетом вероятности риска

- Под оценкой остаточного ресурса понимается срок службы конструкции, в течение которого вероятность достижения параметром конструкции предельного состояния не превышает заданного уровня.
- За характеристику надежности принимается вероятность выхода значения параметра конструкции на предельную границу. В качестве параметра надежности используется сопротивление бетона осевому сжатию R_b .
- Значение сопротивления бетона R_b в момент времени t – случайная величина, распределенная по нормальному закону распределения:

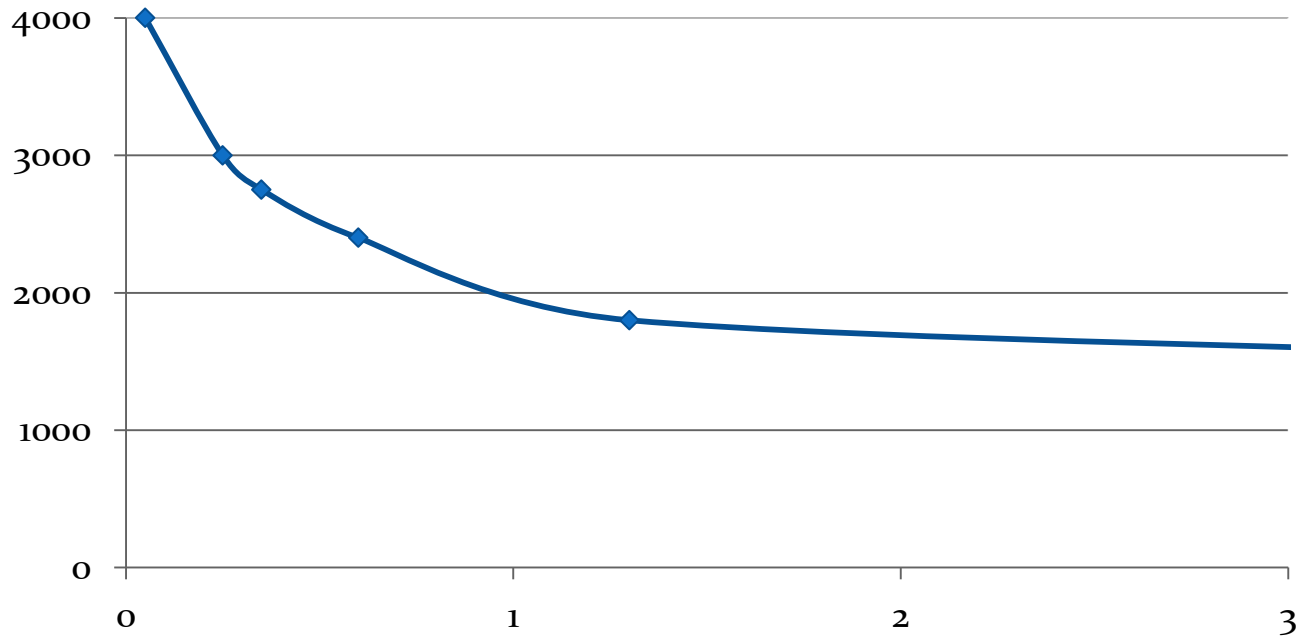
$$f(R, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_R(t)} \cdot e^{-\frac{(r - m_R(t))^2}{2 \cdot \sigma_R^2(t)}}$$

Оценка усталостной деградации арматуры

При действии многократно-повторных нагрузок, необходимо оценивать ресурс по количеству набранных циклов.

В последнее время уделяется значительное внимание усталостной деградации в металлических конструкциях.

Предел прочности
при выносливости,
кгс/см²



Миллионы пульсаций до разрушения N