

ГЛАВА 6. РАСЧЕТНЫЕ СОЧЕТАНИЯ НАГРУЗОК/УСИЛИЙ

Общие положения

Решение задачи об определении наиболее опасных сочетаний нагрузок обеспечивает взаимосвязь между результатами расчета сооружения на различные нагрузки и конструированием его элементов.


Для решения этой задачи применяются различные подходы:

- расчетных сочетаний нагрузок (РСН);
- расчетных сочетаний усилий (PCY).

Способ определения PCY основан на нахождении экстремумов упругого потенциала в любой точке конструкции от действия многих нагрузок (или многих загрузений). Применение PCY приводит к ограниченному (гораздо менее 2^n , где n — количество загрузений) количеству рассматриваемых комбинаций, которые и являются наиболее опасными. При этом проектирование с применением РСН предполагает изучение всех возможных комбинаций, в предельном случае их количество достигает 2^n .

Определение PCY производится по нормативным формулам СНиП, СП или ДБН, а вычисления выполняются на основании вышеописанного способа, учитывающего особенности упругого потенциала, характерные для сечений стержней, пластин, оболочек и объемных тел. Эти особенности позволяют выразить решение задачи выбора опасных сочетаний через критерий экстремальных напряжений в характерных точках сечений. Благодаря этому количество рассматриваемых сочетаний существенно ограничивается.

PCY

Подготовка исходных данных для расчетных сочетаний нагрузок выполняется в редакторе загрузений. Переход в режим осуществляется с помощью команды меню **Редакторы** ⇨ **Редактор загрузений** (кнопка  на панели инструментов).

В редакторе необходимо задать данные в соответствии с общими правилами формирования PCY:

- параметры расчетных сочетаний задаются для каждого из загрузений задачи;
- каждое PCY относится к одному из предусмотренных нормативными документами видов сочетаний;
- реализовано 8 видов загрузений, с помощью которых программно обеспечивается их корректная логическая взаимосвязь.

При этом существует возможность учета знакопеременности, взаимоисключения и сопутствия загрузений. Виды загрузения:

- постоянное;
- длительное;
- кратковременное;

- крановое вертикальное;
- особое;
- мгновенное;
- неактивное.

Все операции по формированию РСУ выполняются в окне редактора загрузений (рис. 6.1).

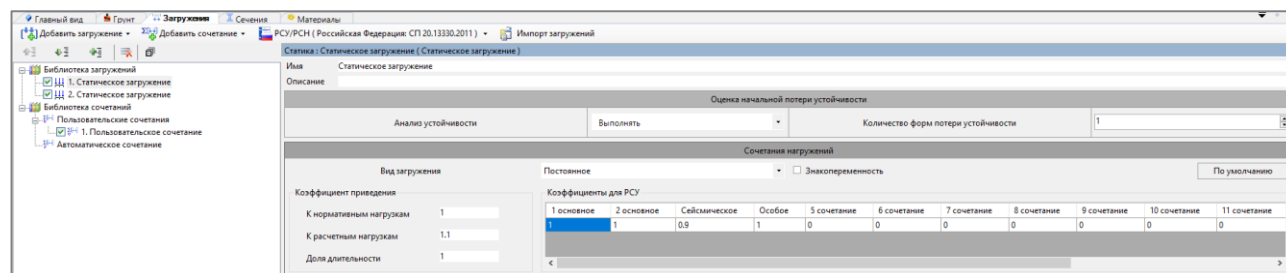


Рис. 6.1. Формирование РСУ

Параметры РСУ включают:

- Коэффициенты к расчетным нагрузкам.
- **Доля длительности** — коэффициент, показывающий, какая часть нагрузки в рассматриваемом загрузении принимается как длительно действующая.
- Учитывать **знакопеременность** — установленный флажок означает, что в РСУ следует учесть вероятность изменения знака основного усилия сочетания. К таким усилиям относятся, например, сейсмические.
- **Сопутствующие загрузения** — имеются в виду загрузения (не более шести), которые могут рассматриваться совместно с основным для данного вида загрузением. Например, если основным является загрузение вертикальными крановыми нагрузками, то сопутствующим является загрузение горизонтальным тормозным воздействием.
- **Взаимоисключающие загрузения** — этим параметром вводятся ограничения на те загрузения, которые не могут входить в одно сочетание одновременно. Такими, например, являются загрузения **Ветер справа** и **Ветер слева**.

Взаимосвязь загрузений

При определении РСУ учитываются логические связи между загрузениями, которые отражают физический смысл загрузений и требования, регламентируемые различными нормативными документами. Выделяются три типа загрузений:

- независимые (собственный вес, вес оборудования и т.п.);
- взаимоисключающие (ветер слева и ветер справа, сейсмическое воздействие вдоль разных осей координат и т.п.);
- сопутствующие (тормозные при наличии вертикальных крановых нагрузок и т.п.).

Предоставляется также возможность обозначить знакопеременность загрузения при одинаковом модуле его вектора.

Производится учет длительности действия загрузений.

Результаты работы расчетной системы РСУ

В результате работы процессора РСУ вычисляется 4 группы сочетаний:

- **группа А** — расчетные значения, учитывающие только те загрузки, которые обладают длительностью действия; в эту группу включаются загрузки постоянными, длительными и кратковременными нагрузками;
- **группа В** — расчетные значения, учитывающие все загрузки независимо от длительности действия;
- **группа АН** — нормативные значения, соответствующие группе А;
- **группа ВН** — нормативные значения, соответствующие группе В.

В таблице результатов печатаются только **расчетные значения** по группам А и В, а группы АН и ВН с нормативными значениями используются конструирующими системами для расчета и проверки сечений стальных и железобетонных элементов.

6.1 РСУ в СТЕРЖНЯХ

В качестве критерия определения РСУ приняты экстремальные значения нормальных и касательных напряжений в контрольных точках условного прямоугольного сечения (рис. 6.2).

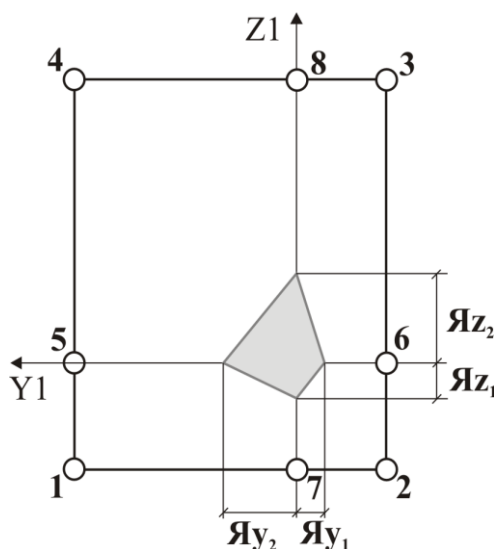


Рис. 6.2. Условное прямоугольное сечение

Для нормальных напряжений применяется следующая формула:

$$\sigma_k = \frac{N}{F} - \frac{M_y}{J_y} Z_k + \frac{M_z}{J_z} Y_k, \quad (6.1)$$

где k — точка сечения стержня ($k = 1 \div 9$).

Эта формула преобразуется следующим образом при $y = \pm \frac{b}{2}$; $z = \pm \frac{h}{2}$:

$$\sigma_k F = N \pm \frac{M_y}{Y_{z,i}} \pm \frac{M_z}{Y_{y,i}}, \quad (6.2)$$

где $Y_{z,i}$ и $Y_{y,i}$ — ядровые расстояния в сечении стержня ($i = 1,2$).

Такой подход позволяет определить экстремальные нормальные напряжения в сечении любой формы, приведя ее к прямоугольной.

Для касательных напряжений используется приближенная формула:

$$\tau_{y,z} F = \frac{Q_{y,z}}{2} \pm \frac{M_{kp}}{2(Y_{y_1,z_1} + Y_{y_2,z_2})} \quad (6.3)$$

Формулы вычисления экстремальных значений для каждой точки сечения приведены в таблице 6.1 (используется принятое для усилий правило знаков), а нумерация «критериальных» значений и соответствующих им напряжений — в таблице 6.2.

Кроме экстремальных напряжений вычисляются также экстремальные значения продольной и перерезывающих сил.

Всего для сечения стержня отбирается 34 значения РСУ.

Таблица 6.1. Формулы вычисления экстремальных значений

№ точки сечения	Нормальные напряжения	Касательные напряжения сечения
1	$\sigma F = N + M_y / Y_{z_2} + M_z / Y_{y_1}$	—
2	$\sigma F = N + M_y / Y_{z_2} - M_z / Y_{y_2}$	—
3	$\sigma F = N - M_y / Y_{z_1} - M_z / Y_{y_2}$	—
4	$\sigma F = N - M_y / Y_{z_1} + M_z / Y_{y_1}$	—
5	$\sigma F = N + M_z / Y_{y_1}$	$\tau F = \frac{Q_z}{2} + \frac{M_{kp}}{2(Y_{y_1} + Y_{y_2})}$
6	$\sigma F = N - M_z / Y_{y_2}$	$\tau F = \frac{Q_z}{2} - \frac{M_{kp}}{2(Y_{y_1} + Y_{y_2})}$
7	$\sigma F = N + M_y / Y_{z_2}$	$\tau F = \frac{Q_z}{2} + \frac{M_{kp}}{2(Y_{z_1} + Y_{z_2})}$
8	$\sigma F = N - M_y / Y_{z_1}$	$\tau F = \frac{Q_z}{2} - \frac{M_{kp}}{2(Y_{z_1} + Y_{z_2})}$

Таблица 6.2. Критерии и их значения

№№ критериев	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение	$\sigma_1 +$	$\sigma_1 -$	$\sigma_2 +$	$\sigma_2 -$	$\sigma_3 +$	$\sigma_3 -$	$\sigma_4 +$	$\sigma_4 -$	$\tau_7 +$	$\tau_7 -$
№№ критериев	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значение	$\tau_8 +$	$\tau_8 -$	$\tau_5 +$	$\tau_5 -$	$\tau_6 +$	$\tau_6 -$	N+	N-	$\sigma_7 +$	$\sigma_7 -$
№№ критериев	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Значение	$\sigma_8 +$	$\sigma_8 -$	$\sigma_5 +$	$\sigma_5 -$	$\sigma_6 +$	$\sigma_6 -$	$Q_{y+}, N+$	$Q_{y-}, N+$	$Q_{y+}, N-$	$Q_{y-}, N-$
№№ критериев	31	32	33	34	—	—	—	—	—	—
Значение	$Q_{z+}, N+$	$Q_{z-}, N+$	$Q_{z+}, N-$	$Q_{z-}, N-$	—	—	—	—	—	—

6.2 РСУ в ПЛАСТИНАХ

РСУ для плоского напряженного состояния

В общем случае главные напряжения в одной и той же точке конструкции для разных нагрузок имеют различную ориентацию. Поэтому здесь определение РСУ производится по огибающим экстремальным кривым нормальных и касательных напряжений по формулам:

$$\sigma_{\alpha_k} = N_x \cos^2 \alpha_k + N_z \sin^2 \alpha_k + T_{xz} \sin 2\alpha_k, \quad (6.4)$$

$$\tau_{\alpha_k} = \frac{1}{2}(N_z - N_x) \sin 2\alpha_k + T_{xz} \cos 2\alpha_k, \quad (6.5)$$

где k — номер загрузки.

Обозначения приведены на рис. 6.3.

Напряжения вычисляются в диапазоне от 0° до 180° .

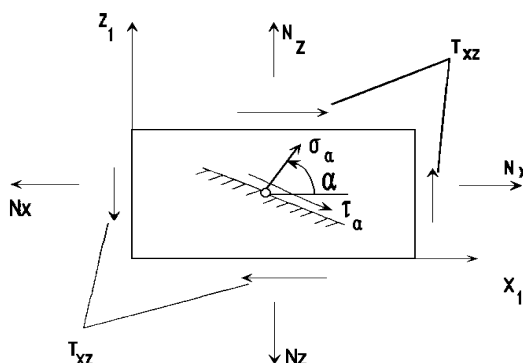


Рис. 6.3. Плоское напряженное состояние

PCY для плит

Здесь применяется подход, аналогичный тому, который описан в предыдущем пункте. Изгибные и крутящий моменты в плите дают возможность определить нормальные и касательные напряжения на верхней и нижней поверхностях плиты. Эти напряжения по модулю равны, поэтому формулы (6.4) и (6.5) приобретают вид:

$$M_{\alpha_k} = M_x \cos^2 \alpha_k + M_y \sin^2 \alpha_k + M_{xy} \sin 2\alpha_k, \quad (6.6)$$

$$M_{c\alpha_k} = \frac{1}{2}(M_y - M_x) \sin 2\alpha_k + M_{xy} \cos 2\alpha_k \quad (6.7)$$

Критерии PCY для оболочек

Здесь также применяется аналогичный подход. Напряжения вычисляются на верхней и нижней поверхностях оболочки. При этом учитываются мембранные напряжения и изгибающие усилия по следующим зависимостям:

$$\sigma_x^{\text{H/B}} = N_x \pm \frac{6M_x}{h^2}; \sigma_y^{\text{H/B}} = N_y \pm \frac{6M_y}{h^2}; \tau^{\text{H/B}} = T_{xy} \pm \frac{6M_{xy}}{h^2}, \quad (6.8)$$

где:

h — толщина оболочки;

B и H — индексы, означающие принадлежность к верхней и нижней поверхностям.

6.3 PCY в ОБЪЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Критерием для определения опасных сочетаний напряжений в общем случае НДС приняты экстремальные значения среднего напряжения (гидростатического давления) и главных напряжений девиатора. Определяются углы наклона главных напряжений в каждом элементе для каждого нагружения. Вычисление производится по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} ln + 2\tau_{yz} mn; \\ \sigma_{\text{TM}} &= \sigma_0 + S_{\text{TM}}; \\ S_x &= \sigma_x \left(1 - \frac{1}{3l^2}\right); S_y = \sigma_y \left(1 - \frac{1}{3m^2}\right); S_z = \sigma_z \left(1 - \frac{1}{3n^2}\right); \\ S_m &= S_x l^2 + S_y m^2 + S_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} ln + 2\tau_{yz} mn \end{aligned} \quad (6.9)$$

где:

σ_ϕ — нормальное напряжение на площадке с направляющими косинусами l, m, n к осям $X1, Y1, Z1$;

S_ϕ — нормальное напряжение девиатора на этой же площадке;

$\sigma_0 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{3}$ — среднее напряжение.

Процесс выбора организован следующим образом. Для данного элемента вычисляются направляющие косинусы главных площадок по всем нагружениям. Если в схеме задано n

загружений, то будет найдено $3n$ площадок. Затем вычисляются напряжения S_{ϕ} на этих площадках от всех загружений и производится накопление положительных и отрицательных значений напряжений.

В соответствии с этим принято обозначение критериев как трехзначных чисел. Первые две цифры обозначают порядковый номер загрузки, на площадке которого вычисляются напряжения от всех загружений. Третья цифра может принимать значения от 1 до 6, которым придается следующий смысл:

- 1 — положительное суммарное значение напряжений на первой главной площадке;
- 2 — отрицательное суммарное значение напряжений на первой главной площадке;
- 3 и 4 — то же на второй главной площадке;
- 5 и 6 — то же на третьей главной площадке.

Так, например, критерий 143 означает, что на второй главной площадке 14-го нагружения получено наибольшее положительное напряжение. Критерий 076 означает, что на третьей главной площадке 7-го нагружения получено наибольшее отрицательное напряжение.

Критерии, соответствующие наибольшему и наименьшему значениям среднего напряжения, обозначаются цифрами 7 и 8 соответственно.

6.4 РСУ в СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Критерием для определения опасных сочетаний в специальных (одноузловых КЭ 56 и двухузловых КЭ 55) элементах приняты экстремальные значения реакций.

Для КЭ 55 и 56 принята нумерация критериев от 1 до 12, соответствующая индексации усилий в этом КЭ.

Для законтурных элементов грунта (КЭ 53, 54) РСУ не вычисляются.

6.5 Унификация РСУ

Под унификацией в ПК ЛИРА подразумевается объединение группы конечных элементов с идентичными свойствами (параметрами материала и размерами сечения) в единый унифицированный элемент. Унификация выполняется на основании РСУ. Из вычисленных значений каждого критерия РСУ выбирается наибольшее и присваивается унифицированному элементу. Унификация целесообразна при конструировании элементов и позволяет для них получить общее конструктивное решение.

Реализованы два типа унификации:

- **1 тип** — группа элементов, обладающая единым сечением; при этом каждый стержневой элемент в этой группе обладает единым по длине расчетным сечением;
- **2 тип** — группа элементов обладает одинаковыми расчетными сечениями в порядке возрастания номеров расчетных сечений, то есть у группы элементов одинаковые первые сечения, одинаковые вторые и т.д. расчетные сечения.

Для стержневых конечных элементов применимы оба типа унификации. Для плоскостных и объемных КЭ применим 1-й тип, так как эти конечные элементы имеют единственное расчетное сечение.

Режим **Унификация РСУ** вызывается кнопкой  на панели инструментов.

Панель режима **Унификация РСУ** содержит список существующих групп унифицированных элементов, в котором можно изменить имя группы и цвет ее индикации на экране. Под списком групп отображается список номеров узлов, из которых состоит текущая группа.

Возможен выбор типа унификации:

- единое сечение для всей группы;
- унификация по отдельным элементам.

Добавление группы унифицированных элементов выполняется при нажатии соответствующей кнопки, также при необходимости есть возможность изменить группу элементов, пополнить группу элементами и удалить группу.

6.6 РСН

Вычисление расчетных сочетаний нагрузжений (РСН) производится непосредственным суммированием соответствующих перемещений узлов и усилий (напряжений) в элементах.

Формирование таблиц РСН возможно с помощью **Пользовательского сочетания** (рис. 6.4) или **Автоматического сочетания** (рис. 6.5). Для **Пользовательского сочетания** в столбце **коэффициент** нужно вручную указать коэффициент в зависимости от типа сочетания и типа нагрузки.

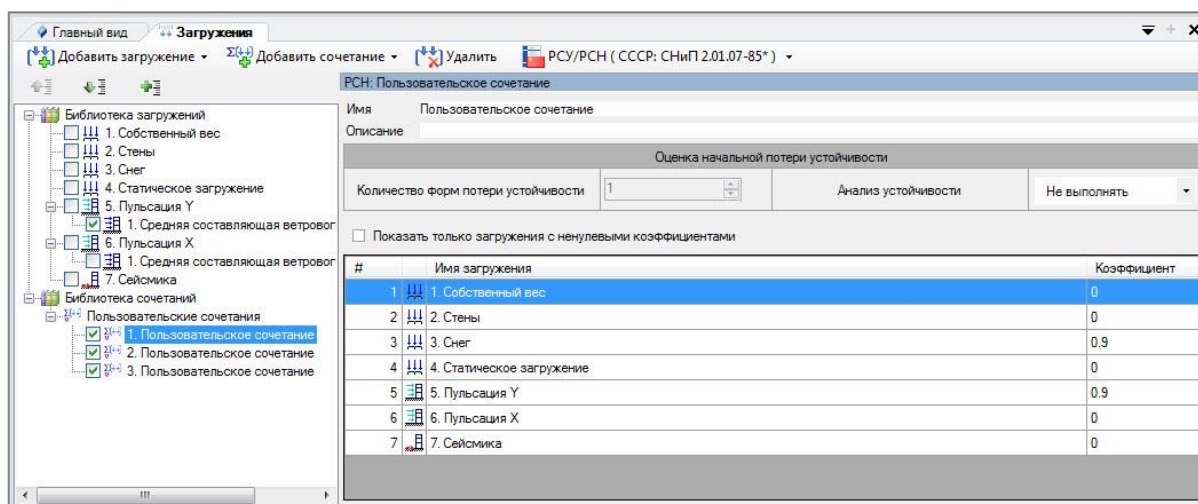


Рис. 6.4. Пользовательское сочетание нагружений

Автоматическое сочетание создается на основании заданных исходных данных по индивидуальным нагружениям. Будет построен граф сочетания, на базе которого будут сгенерированы автоматические сочетания с помощью кнопки **Сгенерировать сочетания**. В случае, если граф был скорректирован, можно добавить сочетания, которые получатся в результате корректировки, с помощью кнопки **Добавить новые сочетания в список**.

Отображение вершин графа подается в двух видах: полное имя загрузки или его порядковый номер в библиотеке. Выбрать вид отображения графа можно с помощью переключателей **Имена загрузок** / **Только номера**.

В случае, если в библиотеке загрузок были добавлены/удалены/отключены загрузки, нужно нажать на кнопку **Перестроить граф** для того, чтобы получить актуальный граф.

Список сгенерированных сочетаний загрузок находится во вкладке **Сочетания**. Выделив строку с сочетанием загрузок и вызвав контекстное меню, можно скопировать это сочетание в пользовательское сочетание загрузок.

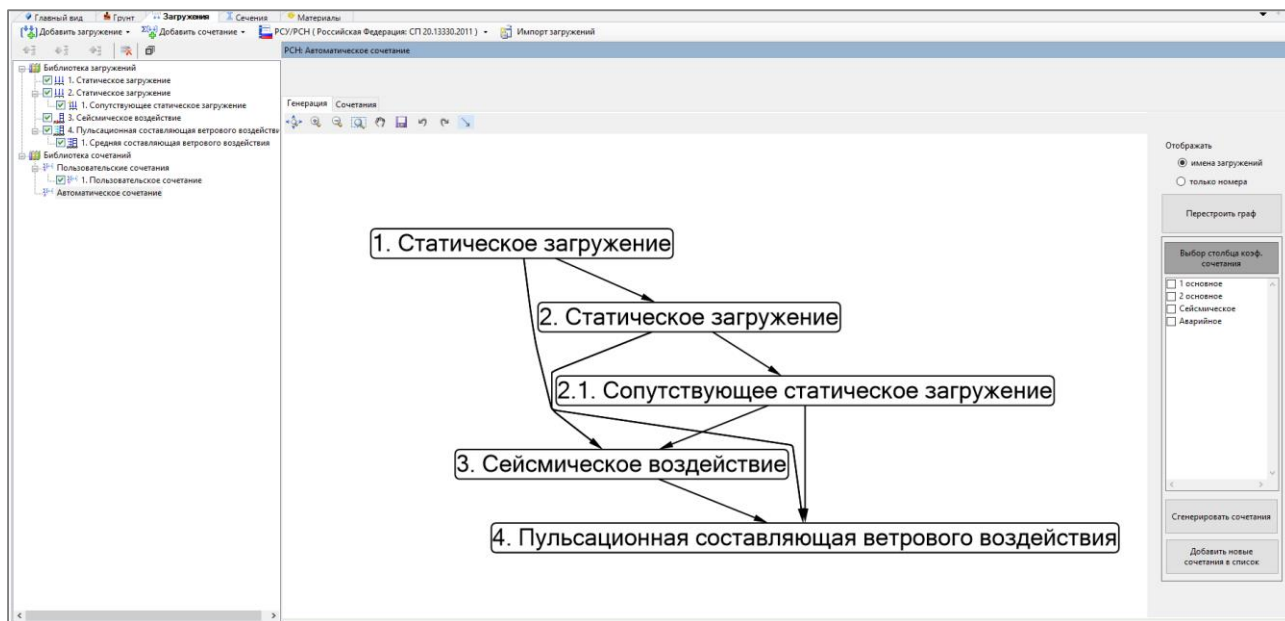


Рис. 6.5. Автоматическое сочетание загрузок