

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

**Н. Е. ПЕТРОВА, А. Е. КАРАНДАШЕВ**

**ПРОДОЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СУДНА**  
*РАСЧЕТ РЕДУКЦИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА  
СУДНА*

*Методические указания к практической работе  
по дисциплине «Конструкция корпуса судна»  
для направления 26.03.02 «Кораблестроение, океанотехника и  
системотехника объектов морской инфраструктуры»*

Мурманск  
2017

## РАСЧЕТ РЕДУКЦИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА СУДНА ПО ПРАВИЛАМ РОССИЙСКОГО РЕЧНОГО РЕГИСТРА

Теоретическая основа расчетов редуционных коэффициентов пластин обшивки и настилов, недеформированных и деформированных продольных ребер жесткости с присоединенным пояском для Правил Российского Речного Регистра (РРР) создана профессором И. О. Тряниным. Далее предлагается, не изменяя этих теоретических основ, выразить их через удобные, физичные, обобщенные параметры, что в большинстве случаев позволяет их существенно упростить и во всех случаях получить простые графики и номограммы для расчета редуционных коэффициентов, удобные для использования на практике. Такими обобщенными параметрами могут быть:

$\frac{t}{t^*}$  — относительная толщина пластины

$\frac{t}{t^*}$  — отношение фактической толщины пластины к минимальной толщине пластины, при которой последняя не теряет устойчивость даже при действии сжимающих напряжений, равных пределу текучести материала;

— гибкость недеформированного продольного ребра жесткости с присоединенным пояском  $\frac{b}{\rho}$  — отношение пролета продольного ребра жесткости к радиусу инерции этого ребра с присоединенным пояском;

— относительная стрелка прогиба деформированного ребра  $\frac{n_0}{b}$  — отношение максимальной стрелки деформированного ребра к его пролету.

### Редуционные коэффициенты сжатых пластин при продольной системе набора

Правилами Российского Речного Регистра [1] предлагается определять редуционный коэффициент пластин при продольной системе набора по формуле

$$\varphi = \frac{\sigma_{кр}}{|\sigma_{жс}|} \quad , (1)$$

где  $|\sigma_{жс}|$  — абсолютное значение сжимающих напряжений в жестких связях,

$\sigma_{кр}$  — критические напряжения сжатой пластины.

Критические напряжения пластины, сжатой вдоль длинной кромки, МПа, должны вычисляться по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{кр} &= \sigma_{\sigma} \text{ при } \sigma_{\sigma} \leq 0,6R_{eH} \\ \sigma_{кр} &= \left( 1,63 - 0,8 \sqrt{\frac{R_{eH}}{\sigma_{\sigma}}} \right) R_{eH} \text{ при } 0,6R_{eH} < \sigma_{\sigma} < 1,6R_{eH} \\ \sigma_{кр} &= R_{eH} \text{ при } \sigma_{\sigma} \geq 1,6R_{eH} \end{aligned} \right\} \quad , (2)$$

где  $\sigma_3$  — эйлеровы напряжения в МПа.

$$\sigma_3 = 78,5 \left( \frac{100t}{a} \right)^2, \quad (3)$$

где  $t$  — толщина пластины, см;

$a$  — длина короткой кромки, см;

$R_{eH}$  — предел текучести материала, МПа.

Введем новую характеристику устойчивости пластины — минимальную толщину, при которой пластина не теряет устойчивость даже при сжимающих напряжениях, равных пределу текучести материала ( $t^*$ ).

Эта толщина определяется по формуле

$$t^* = \frac{a}{100} \sqrt{\frac{1,6 R_{eH}}{78,5}} \quad (4)$$

Кроме того, уровень сжимающих напряжений, действующих на пластину, будем оценивать характеристикой  $n$ :

$$n = \frac{|\sigma_{жс}|}{R_{eH}} \quad (5)$$

После подстановки (4) и (5) в (3) и (2) и преобразований получим два уравнения для определения редуционных коэффициентов гибкой части пластины

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{1,6}{n} \left( \frac{t}{t^*} \right)^2 \quad \text{при} \quad \frac{t}{t^*} \leq 0,612, \\ \varphi &= \frac{1,63}{n} - \frac{0,63}{n} \frac{t}{t^*} \quad \text{при} \quad \frac{t}{t^*} > 0,612 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

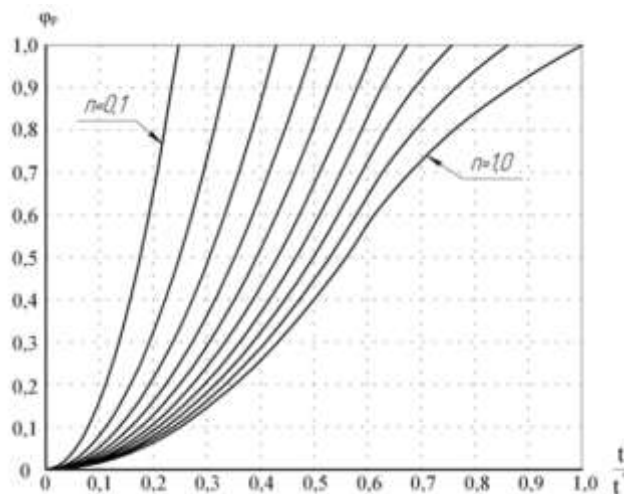


Рис. 1. Редуционные коэффициенты сжатых пластин при продольной системе набора

С использованием уравнений (6) и (4) построены графики, представленные на рис. 1, позволяющие определить редуциционные коэффициенты пластины в зависимости от относительной толщины  $\left(\frac{t}{i'}\right)$  характеризующей гибкость пластины, и уровня сжимающих напряжений, действующих на эту пластину.

### **Редуциционные коэффициенты сжатых продольных ребер жесткости**

Правилами РРР при проектировании корпуса не допускается потеря устойчивости продольных ребер жесткости, однако в процессе эксплуатации в результате износа геометрические характеристики поперечного сечения могут оказаться такими, что при действии расчетной нагрузки ребра будут терять устойчивость. Редуциционные коэффициенты для них в этом случае можно определять по формуле (1). Критические напряжения Правилами РРР рекомендуется определять по формулам

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{кр} = \sigma_{\text{э}} \text{ при } \sigma_{\text{э}} \leq 0,6 R_{eH}; \\ \sigma_{кр} = \left( 1,12 - 0,312 \frac{R_{eH}}{\sigma_{\text{э}}} \right) R_{eH}; \\ \text{при } 0,6 R_{eH} < \sigma_{\text{э}} < 2,6 R_{eH}; \\ \sigma_{кр} = R_{eH} \text{ при } \sigma_{\text{э}} \geq 2,6 R_{eH}. \end{array} \right\} , \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{э}}$  — критические напряжения при сжатии продольного ребра с присоединенным пояском, МПа:

$$\sigma_{\text{э}} = \frac{\pi^2 E J}{b^2 (f + at)}, \quad (8)$$

где  $E$  — модуль нормальной упругости, МПа;

$J$  — момент инерции площади сечения ребра с присоединенным пояском  $0,5a$ , но не более  $25t$ , см<sup>4</sup>;

$f$  — площадь поперечного сечения ребра без присоединенного пояса, см<sup>2</sup>;

$a$  — расстояние между продольными ребрами, см;

$t$  — толщина пластины, см;

$b$  — пролет ребра, см.

Эйлеровы напряжения можно представить в виде

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (9)$$

где

$$\lambda = \sqrt{\frac{b^2}{J/(f+at)}} \quad (10)$$

— гибкость продольного ребра жесткости.

В сопротивлении материалов гибкость стержня оценивается величиной  $\lambda = \frac{\mu b}{\rho}$ ,

где  $\mu$  — коэффициент приведения длины, в рассматриваемом случае  $\mu = 1$ , так как в Правилах РРР принято, что продольное ребро свободно опирается на балки поперечного направления;

$\rho = \sqrt{\frac{J}{F}}$  — радиус инерции поперечного сечения стержня;

$J$  — момент инерции площади поперечного сечения стержня;

$F$  — площадь поперечного сечения стержня.

Несмотря на то, что формально радиус инерции площади поперечного сечения свободного от окружающей конструкции стержня несколько отличается от знаменателя в формуле для гибкости (10), но по физическому смыслу и размерности они вполне могут быть идентифицированы.

Тогда минимальную гибкость ребра, при которой оно не будет терять устойчивость даже при сжимающих напряжениях, равных  $R_{eH}$ , можно определить по формуле

$$\lambda_{\min} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{2,6 R_{eH}}} \quad (11)$$

Введем характеристику относительной гибкости, используя (10) и (11):

$$\frac{\lambda_{\min}}{\lambda} = \sqrt{\frac{\pi^2 E \sigma_{\sigma}}{2,6 R_{eH} \pi^2 E}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\sigma}}{2,6 R_{eH}}} \quad (12)$$

Выразив редуцированный коэффициент ребра через уровень сжимающих напряжений  $n = \frac{|\sigma_{\sigma}|}{R_{eH}}$ , получим

$$\varphi_p = \frac{|\sigma_{kp}|}{n R_{eH}} \quad (13)$$

Используя (13), (12) и (7), получим выражение для вычисления редуцированных коэффициентов сжатых ребер в зависимости от их относительной гибкости

$$\varphi_p = \frac{2,6}{n} \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda} \right)^2, \text{ при } \frac{\lambda_{\min}}{\lambda} \geq 0,48; \quad 6$$

$$\varphi_p = \frac{1}{n} \left( 1,12 - \frac{0,12}{\left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda} \right)^2} \right), \text{ при } 0,48 < \frac{\lambda_{\min}}{\lambda} < 1. \quad (14)$$

По полученным зависимостям построен график для определения редуционных коэффициентов продольных ребер жесткости в зависимости от их относительной гибкости, представленный на рис. 2.

### **Редуционные коэффициенты изогнутых продольных ребер жесткости**

Несущая способность изогнутых продольных ребер жесткости уменьшается при действии не только сжимающей, но и растягивающей нагрузки. Правилами РРР предлагается вычислять редуционные коэффициенты изогнутых продольных ребер жесткости по формулам

$$\left. \begin{aligned} \varphi_p &= \varphi_0 X Y k_{II}, \text{ при } n \leq n_1 \\ \varphi_p &= \varphi_0 k_{II}, \text{ при } n_1 < n \leq 0 \\ \varphi_p &= \varphi_0, \text{ при } 0 < n \leq n_2 \\ \varphi_p &= \varphi_0 X_1, \text{ при } n_2 \leq n \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где  $\varphi_0$  — коэффициент, определяемый по табл. 1;

*Таблица 1*

$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$	$\varphi_0$ при $h_0 / \rho$ равном										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	0,916	0,719	0,516	0,363	0,260	0,193	0,147	0,115	0,093	0,076
1	1	0,889	0,667	0,471	0,333	0,242	0,182	0,140	0,111	0,090	0,074
-1	1	0,848	0,609	0,428	0,307	0,227	0,172	0,139	0,107	0,087	0,072

$h_0$  — стрелка прогиба деформированного ребра;

$\rho$  — радиус инерции площади поперечного сечения деформированного ребра, см,

равный  $\sqrt{J_p / F_p}$ ;

$J_p, F_p$  — площадь поперечного сечения, см<sup>2</sup>, и момент инерции этой площади относительно нейтральной оси, см<sup>4</sup>, продольного деформированного и изношенного ребра с присоединенным пояском шириной, равной  $a$ ;

$\sigma_m$  — напряжение в жестких связях на уровне центра тяжести площади поперечного сечения ребра с присоединенным пояском;

$\sigma_\varepsilon$  — эйлеровое напряжение ребра, МПа:

$$\sigma_\varepsilon = \pi^2 E J_p / (F_p b^2); \quad (16)$$

$K_n$  принимается равным единице для ребер палуб судов, площадок и ребер второго дна и 0,85 в остальных случаях;

$n_1, n_2$  — числа, вычисляемые по формуле

$$n_1, n_2 = \pm \left( 1,056 + 0,021 \frac{h_0}{\rho^2} - 0,145 \frac{h_0}{\rho^2} - 0,131 \frac{z_{\max}}{\rho} \right), \quad (17)$$

число  $n_1$  — отрицательное,  $n_2$  — положительное;

$X, X_1, Y$  — величины, вычисляемые по формулам

$$X = 1 + n \left[ \begin{array}{l} -0,402 + 1,60 \frac{h_0}{b} - 0,015 \frac{\sigma_\varepsilon}{R_{eH}} - 0,982 n - 45,2 \frac{h_0^2}{b^2} + \\ + 0,614 \frac{h_0}{b} \cdot \frac{\sigma_\varepsilon}{R_{eH}} - 0,00142 \frac{\sigma_\varepsilon^2}{R_{eH}^2} - 0,362 n^2 \end{array} \right], \quad (18)$$

$$X_1 = 1 + n \left[ \begin{array}{l} 0,400 - 2,90 \frac{h_0}{b} + 0,0137 \frac{\sigma_\varepsilon}{R_{eH}} - 0,896 n + 50,1 \frac{h_0^2}{b^2} - \\ - 0,522 \frac{h_0}{b} \cdot \frac{\sigma_\varepsilon}{R_{eH}} + 0,00123 \frac{\sigma_\varepsilon^2}{R_{eH}^2} + 0,329 n^2 \end{array} \right], \quad (19)$$

$$Y = 1 - \frac{1 \cdot 10^{-3} p a b^2 H_p}{J_p R_{eH}} \left( 0,0271 + 0,169 \frac{h_0}{b} - 0,00292 \frac{\sigma_\varepsilon}{R_{eH}} \right), \quad (20)$$

если какой-либо коэффициент, определенный по формулам (18), (19) и (20), получается отрицательным, то его следует принимать равным нулю, если больше единицы — равным единице;

$n$  — относительное напряжение, равное  $n = \frac{\sigma_{жс}}{R_{eH}}$

$p$  — давление груза на настил, который поддерживается ребром, кПа;

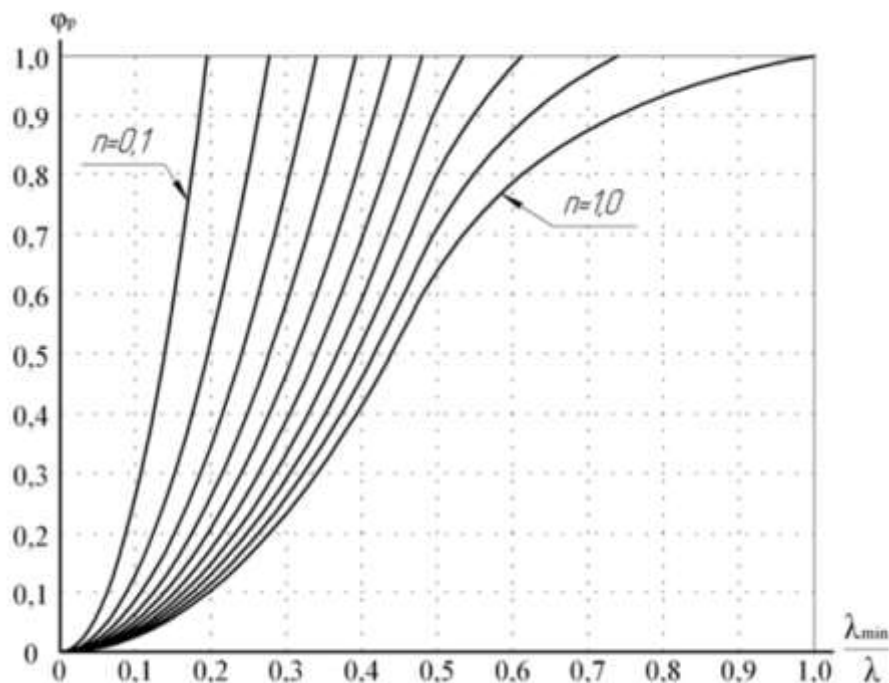


Рис. 2. Редукционные коэффициенты продольных ребер жесткости

$H_p$  — высота ребра, см;

$z_{\max}$  — отстояние крайнего волокна полки от нейтральной оси поперечного сечения ребра с присоединенным пояском.

Величину  $\frac{h_0}{\rho}$  можно представить как произведение двух величин, каждая из которых имеет определенный физический смысл:

$\frac{h_0}{b}$  — относительный прогиб ребра и

$\lambda = \frac{b}{\rho}$  — гибкость ребра без прогиба.

Введя новые величины в табл. 1, можно построить графики изменения  $\phi_0$  в зависимости от относительного прогиба при различной их гибкости. В далее приводимых номограммах (рис. 3–6) это графики в правой части.

Величину  $X$  целесообразно преобразовать и представить в виде

$$\begin{aligned}
 X = & 1 - 0,362 n^3 - 0,982 n^2 + \\
 & + n \left( -0,402 + \left( 1,60 - 45,2 \frac{h_0}{b} \right) \frac{h_0}{b} \right) + \\
 & + n \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 R_{eH}} \left( -0,015 + 0,614 \frac{h_0}{b} - 0,00142 \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 R_{eH}} \right).
 \end{aligned} \tag{22}$$

Величина  $X$  используется только для расчета редукционных коэффициентов сжатых деформированных ребер, поэтому напряжения в соседних прямых ребрах имеют знак минус, а множитель  $n$  в выражении (22) отрицателен. Расчеты для построения номо-



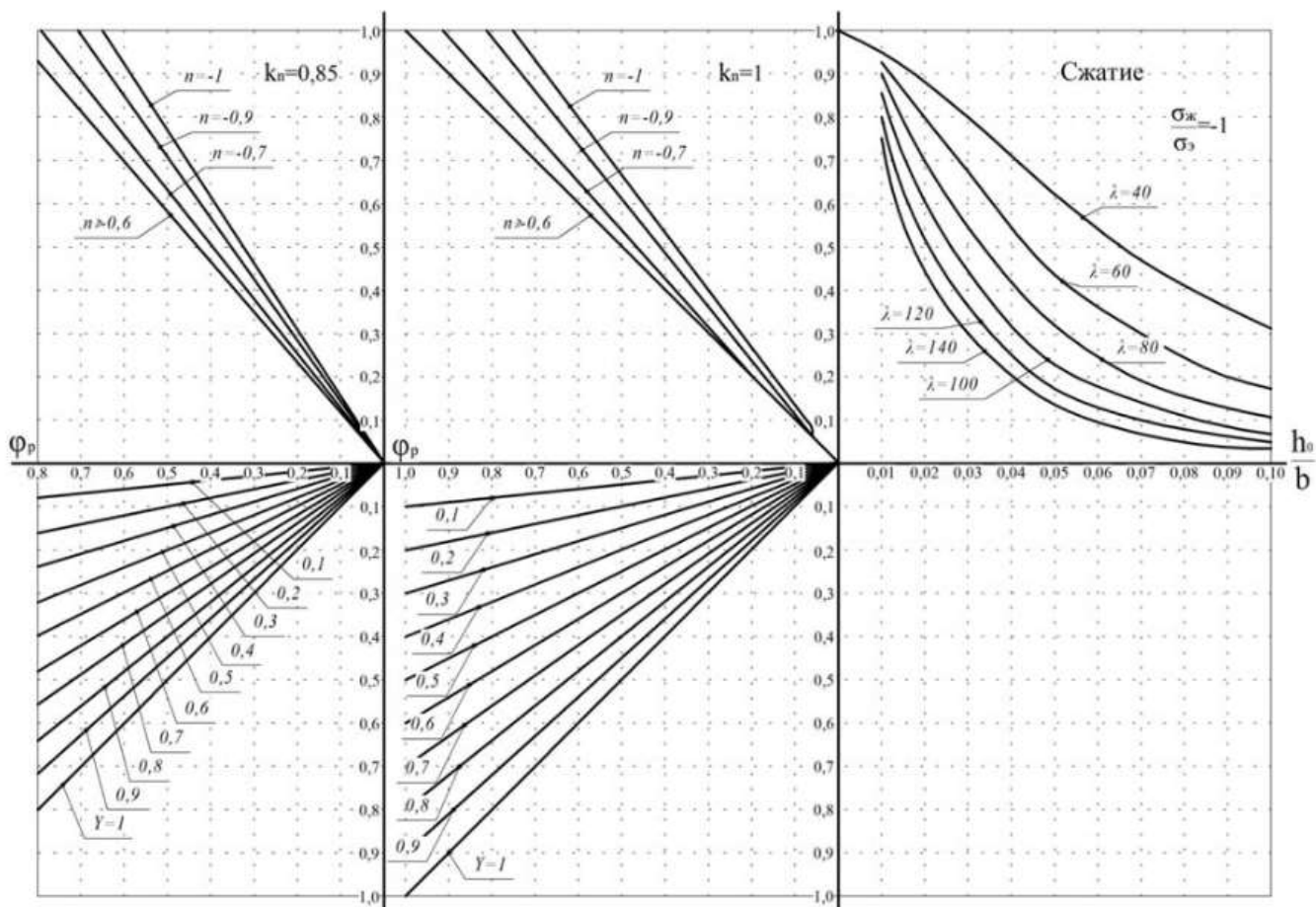


Рис. 3. Вариант 1 (см. центр верх. граф.)

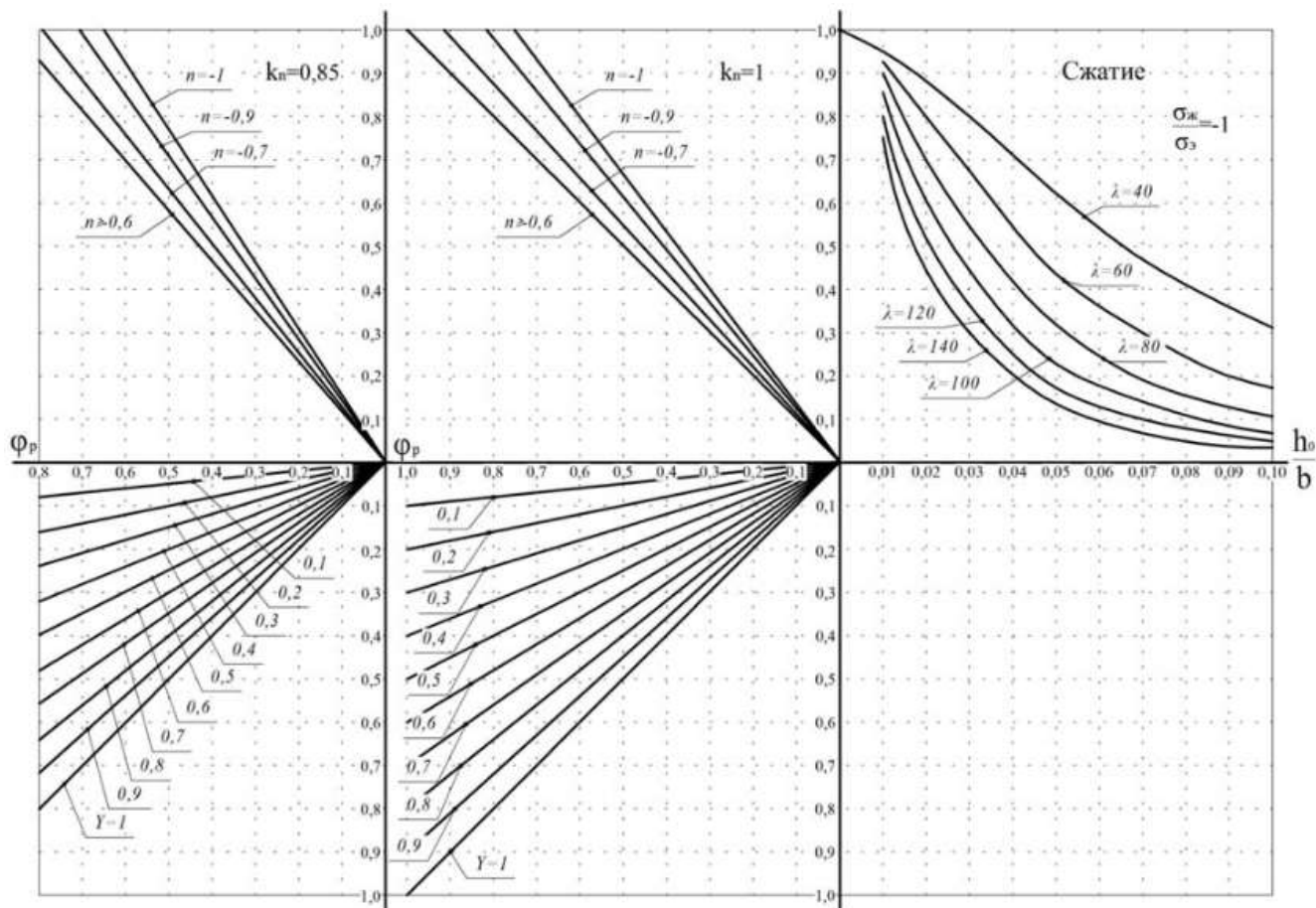


Рис. 3. Вариант 2 (см. центр верх. граф.)

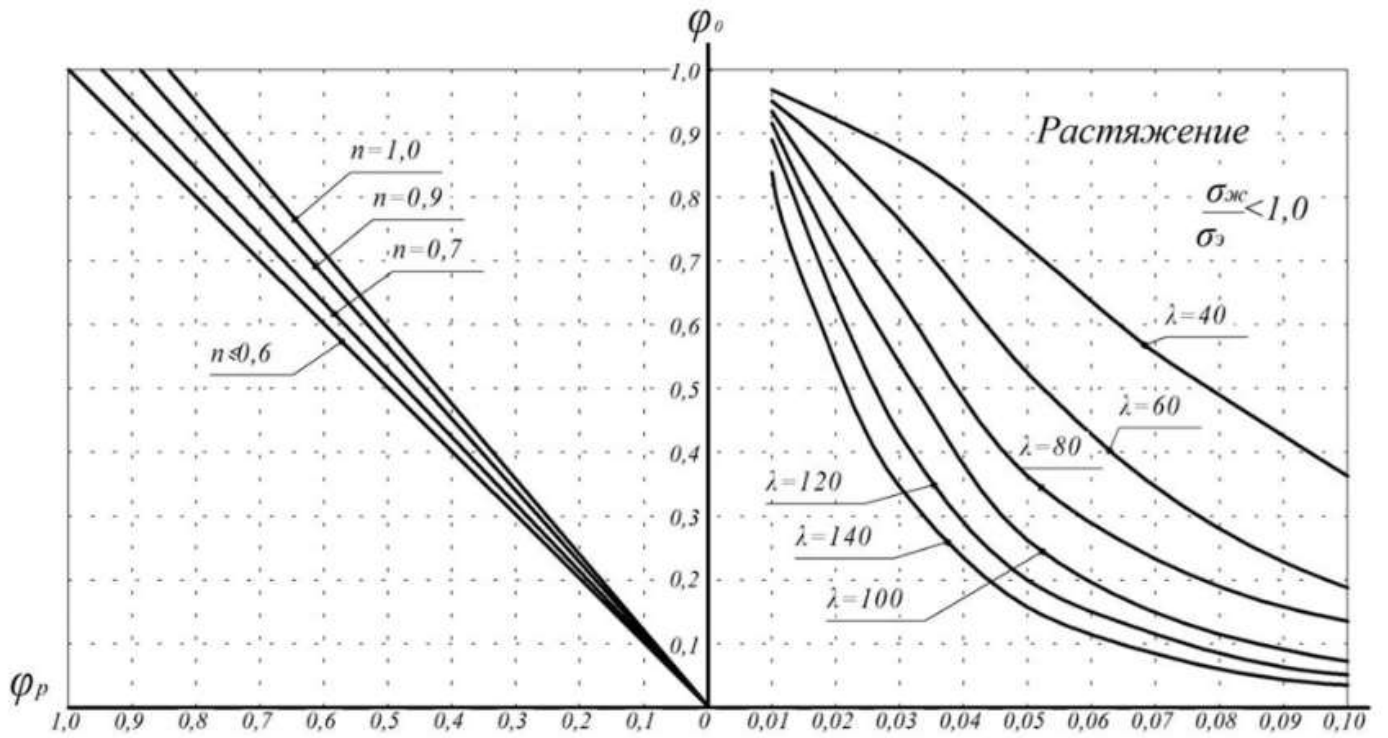


Рис. 4

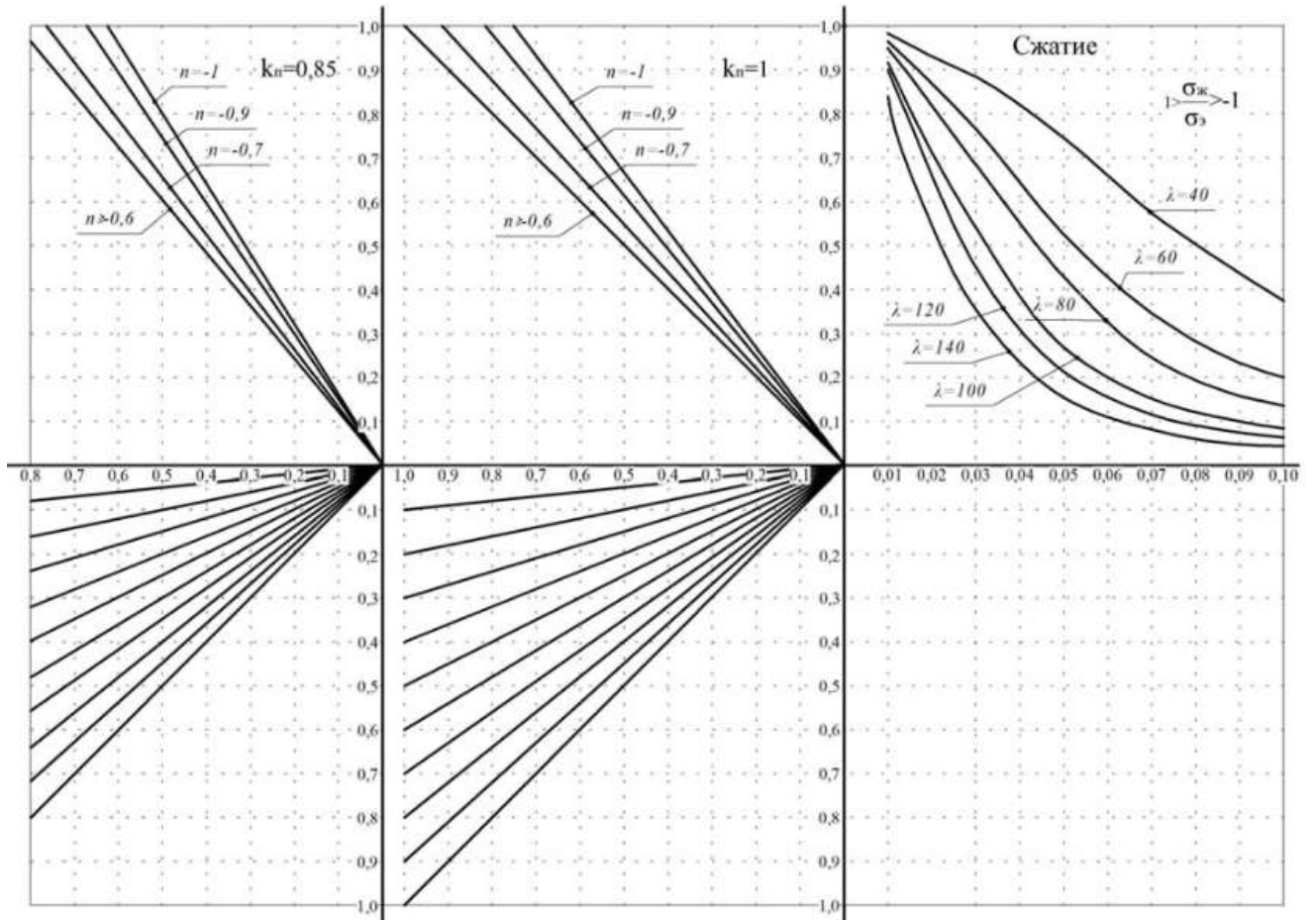


Рис. 5

раммы показали, что отклонения от линии на номограмме соответствующей гибкости  $\lambda = 100$  не заметно. Кроме того, при построении номограммы нет необходимости вычислять величину  $n_1$ , так как при граничных  $n_1$  величина  $X$  становится равной единице. На номограммах (рис. 3, 4) видно, что  $n \leq -0,6$ . Правая часть номограммы на этих рисунках представлена в двух вариантах: для  $k_n = 1$  и  $k_n = 0,85$ .

Величина  $Y$  также используется только для расчета редуцированных коэффициентов сжатых изогнутых стержней, ее удобнее представить в виде, указанном ниже, но использовать в номограмме, как обобщенный параметр.

$$Y = 1 - k_1 k_2 \left( 0,0271 + 0,169 \frac{h_0}{b} \right) + k_1 k_2 k_3 \cdot 0,00292, \quad (23)$$

где  $k$  — относительная нагрузка:

$$k_1 = \frac{10^{-3} p}{R_{eff}} \quad (24)$$

$p$  — давление груза на настил, который поддерживается ребром, кПа;

$k_2$  — коэффициент:

$$k_2 = \frac{aH_p}{F_p} \cdot \lambda^2; \quad (25)$$

$H_p$  — высота ребер, см;

$k_3$  — коэффициент:

$$k_3 = \frac{\sigma_s}{R_{eff}} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 R_{eff}}. \quad (26)$$

На рис. 3 и 4 представлены номограммы для расчета редуцированных коэффициентов деформированных продольных ребер жесткости в сжатой зоне.

Для расчета редуцированных коэффициентов деформированных ребер в растянутой зоне используется величина  $X_1$ , которая после преобразования представляется в виде

$$\begin{aligned} X_1 = & 1 + 0,329n^3 - 0,869n^2 + \\ & + n \left( 0,400 - \left( 2,90 - 50,1 \frac{n_0}{b} \right) \frac{n_0}{b} \right) + n \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 R_{eff}} \\ & + \left( 0,0137 - 0,522 \frac{h_0}{b} + 0,00123 \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 R_{eff}} \right) + \end{aligned} \quad (27)$$

Множитель  $n$  в выражении (27) всегда положителен.

Расчеты для построения номограммы показали, что отклонение от линии на номограмме от линии соответствующей гибкости  $\lambda = 100$  незначительно. Кроме того, при построении номограммы нет необходимости вычислять величину  $n_2$ , так как при граничных  $n_2$  величина  $X_1$  становится равной единице.

На рис. 5 и 6 представлены номограммы для расчета редуцированных коэффициентов деформированных продольных ребер жесткости в растянутой зоне.

## **Список литературы**

1. Российский Речной Регистр. Правила: в 4 т. — 2008. — Т. 2.