

**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

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

где σ_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

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

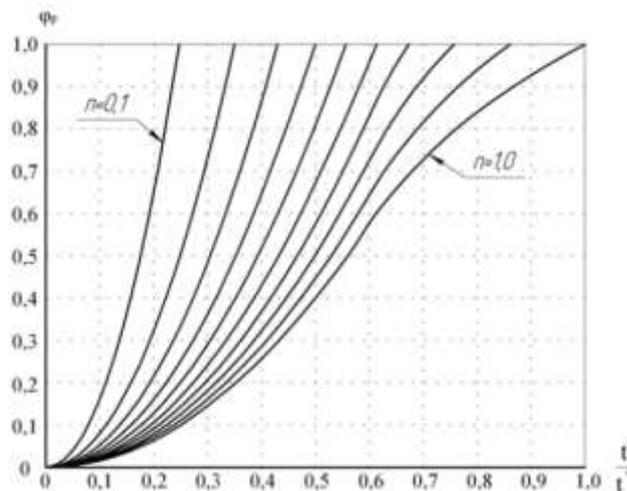


Рис. 1. Редуционные коэффициенты сжатых пластин при продольной системе набора

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

Редуцированные 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. Редуцированные коэффициенты для них в этом случае можно определять по формуле (1). Критические напряжения Правилами РРР рекомендуется определять по формулам

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

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 $25t$, см⁴;

f — площадь поперечного сечения ребра без присоединенного пояса, см²;

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 μ — 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

$$\varphi_P = \frac{|\sigma_{кр}|}{n R_{eH}} \quad (13)$$

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 φ_0 — коэффициент, определяемый по табл. 1;

Таблица 1

$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$	φ_0 при h_0 / ρ 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;

ρ — радиус инерции площади поперечного сечения деформированного ребра, см,

равный $\sqrt{J_p / F_p}$;

J_p, F_p — площадь поперечного сечения, см², и момент инерции этой площади относительно нейтральной оси, см⁴, продольного деформированного и изношенного ребра с присоединенным пояском шириной, равной a ;

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

σ_ε — 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;

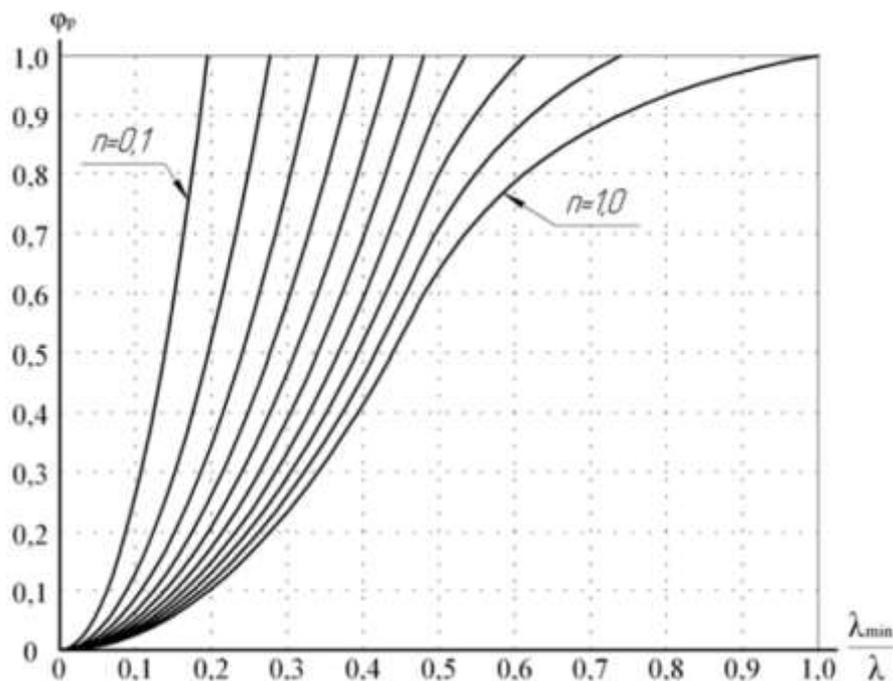


Рис. 2. Редукционные коэффициенты продольных ребер жесткости

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 ϕ_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-

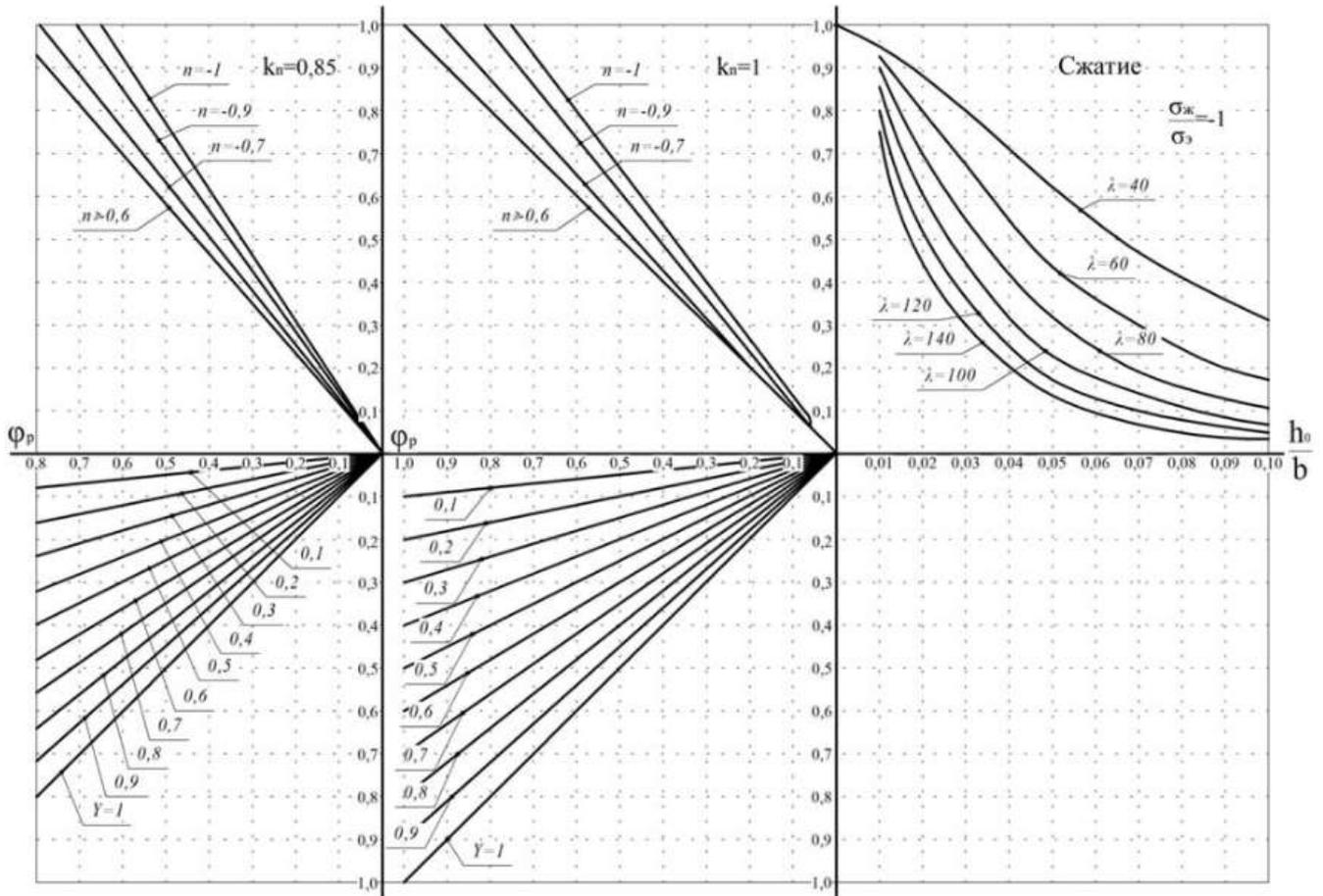


Рис. 3. Вариант 1 (см. центр верх. граф.)

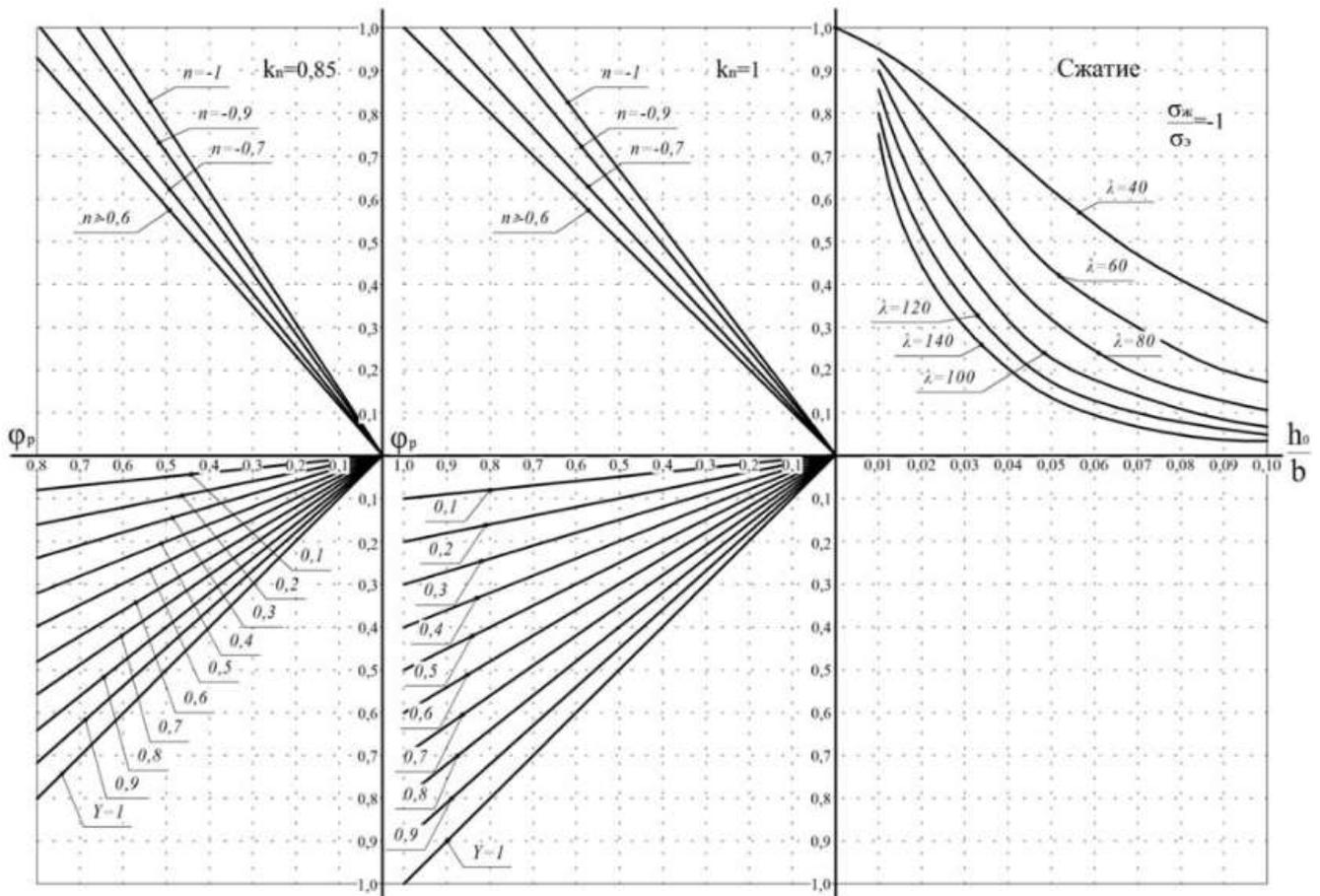


Рис. 3. Вариант 2 (см. центр верх. граф.)

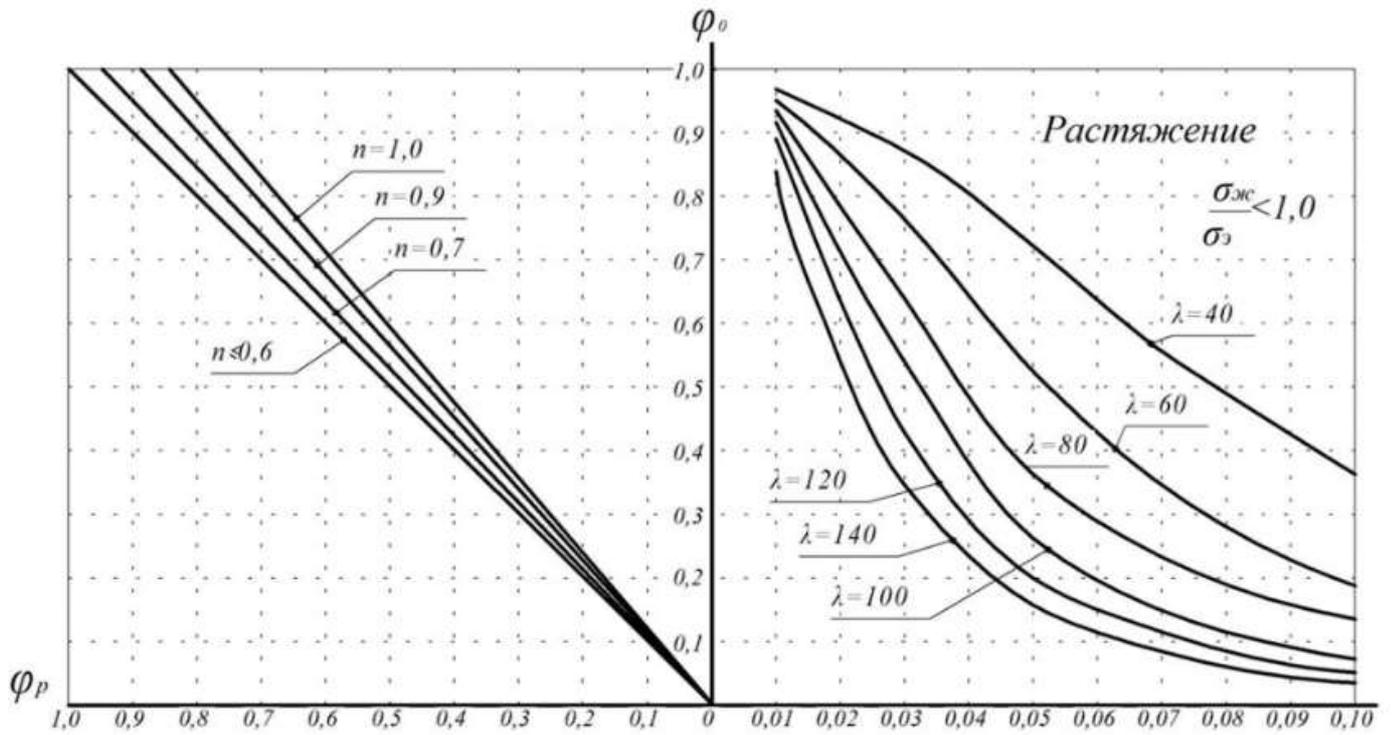


Рис. 4

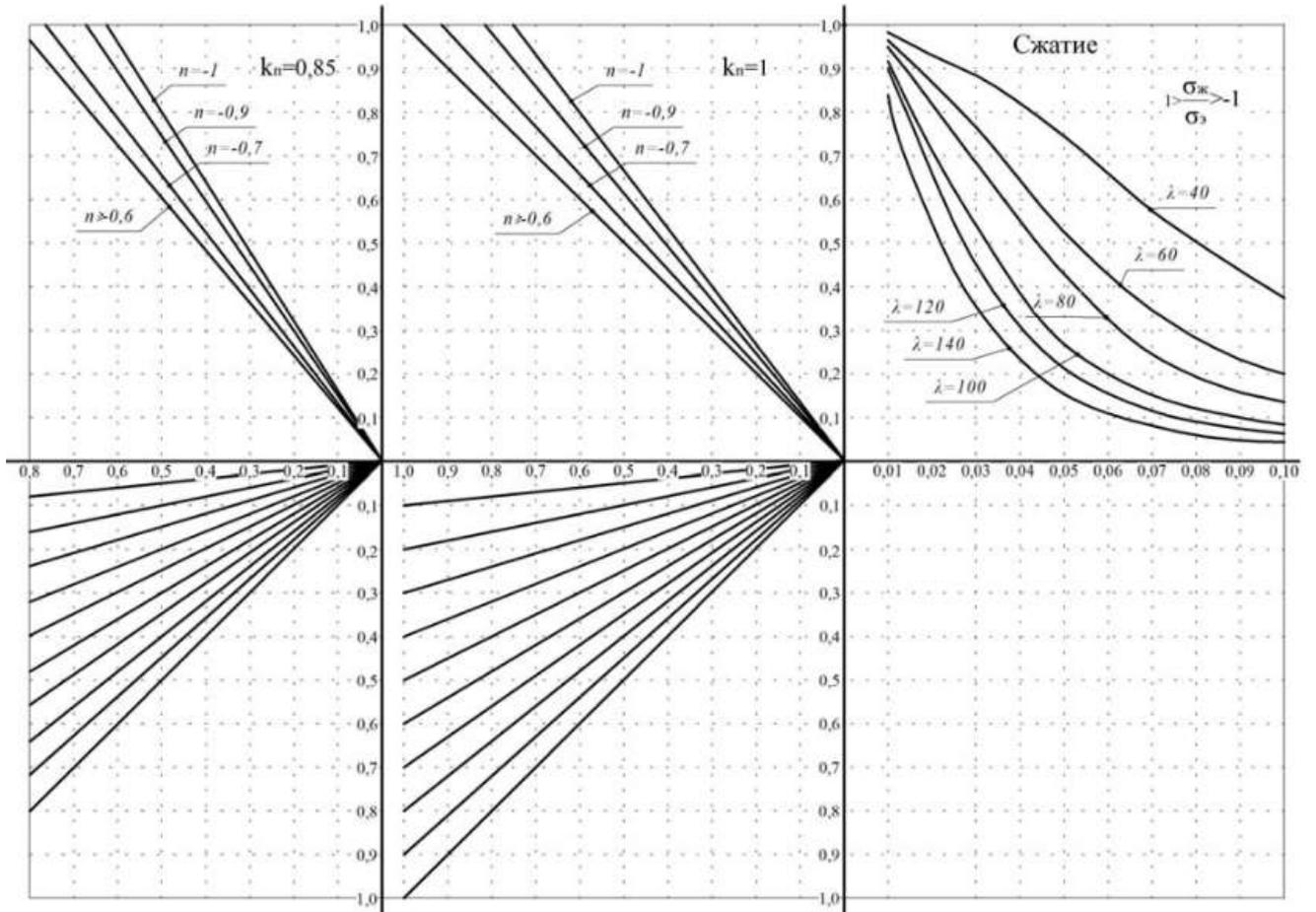


Рис. 5

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.