

УДК 629.12

**Гирин Станислав Николаевич<sup>1</sup>**, к.т.н., профессор

e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

**Булычева Галина Сергеевна<sup>1</sup>**, аспирант

e-mail: bulycheva1989g@yandex.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛА НА ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕДУКЦИОННОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЕФОРМИРОВАННОГО СТЕРЖНЯ

*Аннотация.* Решается задача определения редуцированных коэффициентов стержня, имеющего начальную погибь косинусоидальной формы, нагруженного по концам сжимающей нагрузкой и поперечной нагрузкой с использованием возможностей программного комплекса «ANSYS». Редуцированные коэффициенты определяются отдельно с учетом геометрической нелинейности задачи, а также при совместном учете геометрической и физической нелинейности. Результаты сравниваются с решением, приведенным в Правилах Российского Речного Регистра.

*Ключевые слова:* геометрическая нелинейность, физическая нелинейность, редуцированный коэффициент, метод конечных элементов

Опыт эксплуатации судов показывает, что со временем конструкции, испытывающие нагрузки со стороны грейферов, получают остаточные деформации. Наибольшие деформации испытывают настилы, однако, и холостой набор также деформируется. При значительных величинах остаточного прогиба ребер их нельзя рассматривать как жесткие связи в составе эквивалентного бруса при проверке общей прочности корпуса, поэтому их площади поперечного сечения должны вводиться в состав эквивалентного бруса с учетом редуцированного коэффициента.

В Правилах Российского Речного Регистра [1] имеются зависимости для вычисления редуцированного коэффициента  $\varphi_r$  таких ребер, полученные на основе исследований, выполненных А.В. Ивановым [2]. В методике А.В. Иванова ребро рассматривается как изначально изогнутый гибкий стержень, нагруженный продольными усилиями от общего изгиба корпуса судна, а также поперечной нагрузкой. Рассмотрены три вида начальной погиби ребра: синусоидальная, косинусоидальная и вмятина. При синусоидальной погиби ребро имеет в соседних пролетах одинаковые по величине, но разные по знаку стрелки погиби. При косинусоидальной погиби стрелки погиби одинаковы во всех пролетах ребра. При вмятине деформирован лишь один пролет. На практике синусоидальная погибь возникает под воздействием сварочных деформаций. В этом случае стрелки погиби ребра малы и не представляют опасности. Практический интерес представляют деформации ребер в виде косинусоиды и вмятины. Эти виды деформации и представлены в Правилах [1].

Определением редуционных коэффициентов до А.В. Иванова занимались и другие авторы, однако, достоинством методики А.В. Иванова является то, что она учитывает возможность появления пластических деформаций в ребре при больших значениях поперечной нагрузки и осевых напряжений. Вместе с тем, учет влияния пластических деформаций выполнен А.В. Ивановым приближенно с учетом ряда гипотез. В настоящее время задачу можно решить достаточно точно с использованием возможностей программного комплекса «ANSYS» по решению задач с учетом геометрической и физической нелинейности. Возможности применения данного комплекса для решения задач устойчивости стержней с учетом геометрической и физической нелинейности были показаны авторами в работах [3] и [4].

В данной работе ставится задача определения редуционных коэффициентов для деформированных балок с использованием «ANSYS» и сравнения их с аналитическими расчетами по Правилам [1].

Исследуемая модель представляет собой четырехпролетную балку, имеющую сечение в виде тавра со стенкой 6×60, полкой 10×20 с присоединенным пояском 12×200. Рассматривались две длины пролета: 2,4 м и 1,8 м. Общий вид геометрической модели представлен на рисунке 1. Характер деформации модели показан на рисунке 2. Модель загружалась продольной нагрузкой в виде равномерно приложенных давлений (напряжений) по торцам балки и поперечной нагрузкой. Величина поперечной нагрузки задавалась такой, при которой напряжения в балке от ее действия достигали 0,35  $R_{eh}$ . Величина сжимающих напряжений варьировалась.

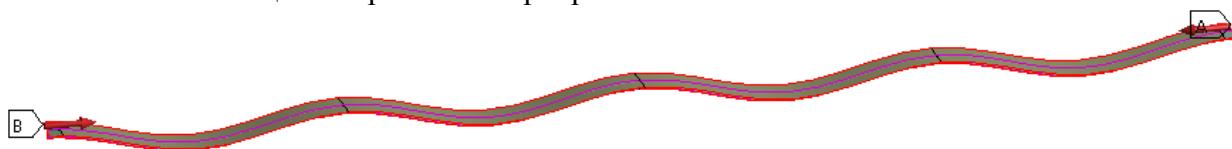


Рисунок 1 – Общий вид геометрической модели до приложения нагрузки



Рисунок 2 – Деформация балки после приложения осевых сжимающих напряжений и поперечной нагрузки

Зависимость между напряжениями и деформациями принята по упруго–пластической диаграмме с линейным упрочнением. Предел текучести  $R_{eh} = 235$  МПа, касательный модуль упругости  $E_{\tau} = 1450$  МПа.

Характерным параметром при вычислении  $\varphi_p$  по Правилам [1] является отношение  $h/\rho$ , где  $h$  – стрелка погиби деформированной балки, м;  $\rho$  – радиус инерции, м.

Также по расчетам значительное влияние на  $\varphi_p$  прослеживается в зависимости от отношения  $h/b$ , где  $b$  – длина балки, равная расстоянию между рамными поперечными связями, на которые опирается балка, м.

Некоторые результаты расчетов представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

В таблице 1 приняты обозначения:

Ansyes ГН – расчет с учетом геометрической нелинейности;

Ansyes ГФН – расчет с учетом геометрической и физической нелинейности.

Таблица 1 – Значения коэффициента  $\varphi_p$

Вид решения	$\sigma_{ж}/R_{eh}$	$\varphi_p$ при $h/\rho$						
		0,2	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	10,0
PPP	0,01	0,978	0,944	0,888	0,666	0,332	0,181	0,074
Ansys ГН		1,021	0,996	0,936	0,681	0,426	0,170	0,067
Ansys ГФН		1,021	0,996	0,936	0,681	0,468	0,170	0,072
PPP	0,1	0,977	0,941	0,882	0,653	0,322	0,172	0,069
Ansys ГН		1,021	0,995	0,915	0,664	0,426	0,170	
Ansys ГФН		1,021	0,995	0,915	0,664	0,426	0,170	0,068
PPP	0,2	0,975	0,938	0,874	0,637	0,311	0,161	0,063
Ansys ГН		1,021	0,989	0,904	0,643	0,404	0,170	
Ansys ГФН		1,021	0,989	0,904	0,643	0,402	0,170	0,066
PPP	0,4	0,973	0,931	0,859	0,604	0,286	0,133	0,048
Ansys ГН		1,021	0,983	0,894	0,617			
Ansys ГФН		1,021	0,983	0,886	0,617	0,385	0,165	0,064

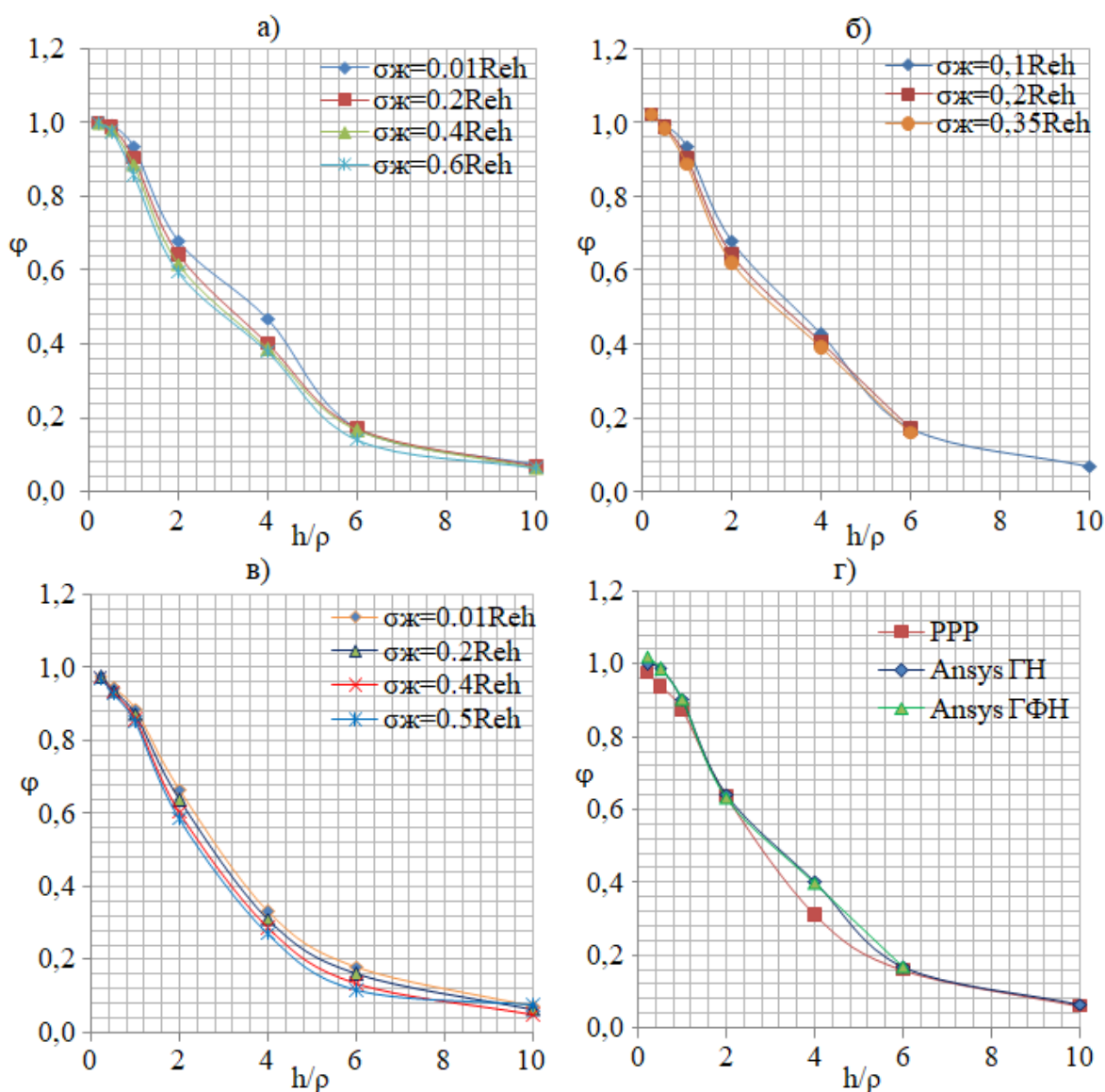


Рисунок 3 – Графики  $\varphi_p$  в зависимости  $h/b$ :

а) расчет в «ANSYS» с учетом геометрической нелинейности;

- б) расчет в «ANSYS» с учетом геометрической и физической нелинейности;
- в) расчет по Правилам [1];
- г) сравнение методов расчета для  $\sigma_{жк}/R_{eh}=0,4$ .

Выводы:

1. Результаты расчета достаточно точно совпадают с зависимостями, представленными в правилах РРР.
2. Из представленных зависимостей следует, что влияние параметра  $\sigma_{жк}/R_{eh}$  слабо сказывается на величине редуцированного коэффициента, определяющими величинами являются отношения  $h/\rho$  и  $h/b$ .
3. Влияние физической нелинейности несущественно сказывается на результатах расчета.

#### Список литературы:

1. Российский Речной Регистр. Правила (в 5-и томах). Т.2.- М.: типография ООО «УП ПРИНТ». 2019. – 432 с
2. Иванов А.В. Влияние вмятин на общую прочность корпусов судов внутреннего плавания: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.08.02. – Нижегородский институт инженеров водного транспорта, Нижний Новгород, 1992 – 200 с.
3. Булычева Г.С., Гирин С.Н. Экспериментальное исследование несущей способности сжатого-изогнутого стержня. // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения Р.Е. Алексева. Н. Новгород, 2021. С. 459-463.
4. Булычева Г.С., Гирин С.Н. Определение несущей способности сжатого стержня с начальным прогибом. // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения Р.Е. Алексева. Н. Новгород, 2021. С. 464-468.

### ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE PHYSICAL NONLINEARITY OF THE MATERIAL ON THE CALCULATION OF THE REDUCTION COEFFICIENT OF A DEFORMED BEAM

Stanislav N. Girin, Galina S. Bulycheva

*Abstract. The problem of determining the reduction coefficients of a bar with an initial deflection of a cosine shape, loaded at the ends with a compressive load and a transverse load is solved using the capabilities of the ANSYS software package. The reduction coefficients are determined separately, taking into account the geometric nonlinearity of the problem, as well as when taking into account the geometric and physical nonlinearities. The results are compared with the solution given in the Rules of the Russian River Register.*

*Keywords: geometric nonlinearity, physical nonlinearity, reduction factor, finite element method.*