

Б43

**Министерство путей сообщения СССР**

**Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени институт  
инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина**

**На правах рукописи**

**БЕЛИКОВ Борис Григорьевич**

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОЛЬЦА  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРЕССУЮЩИМ КОЛЬЦАМ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Специальность 01.02.03 — Строительная механика**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени кандидата**  
**технических наук**

**Днепропетровск — 1980**

НТБ  
ДНУЖТ

Работ  
номер инв

68759

строитель-

доку

Б43 | Белков БГ  
Реш. задачи  
пространств. дозором  
1980 | 1-00

Л. П.

доку  
Кантор

сотрудник

ме-  
ор»

02  
ук  
го  
ек,  
и-  
г.

И  
Л  
В  
В  
Т

НТБ  
ДНУЖТ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Поставленные XXIV и XXV съездами Коммунистической партии Советского Союза задачи максимального ускорения научно-технического прогресса требуют постоянного улучшения качества проектирования изделий, совершенствования методов расчета, позволяющих применять средства современной вычислительной техники. В решениях последующих пленумов ЦК КПСС выделен ряд чрезвычайно актуальных задач практического внедрения новых научных идей.

6875а-  
В частности, среди задач, имеющих прикладное значение для машиностроения и строительства, нуждается в дополнительном исследовании задача о расчете колец на податливом основании. Хотя детали и конструкции в форме кольца повсеместно применяются (например, кольцевые фундаментные плиты в строительстве и прессующие кольца для обмоток силовых трансформаторов в электротехнической промышленности), до настоящего времени отсутствовал метод расчета колец на податливом основании и жестких опорах, в котором совмещались бы научная строгость, необходимая точность и облегченная практическая применимость в инженерных расчетах.

Разработка и внедрение методов расчета колец, опирающихся на жесткие опоры и податливое основание одновременно, в направлении более полного учета реальных условий работы, в частности влияния моментного отпора основания, произвольного распределения нагрузки, различных моделей упругого основания и нелинейности деформирования основания, позволяет повысить точность расчетов и, следовательно, эксплуатационные качества конструкций.

Получение решений с учетом указанных выше факторов связано со значительными математическими трудностями, в

НТБ  
ДНУЖТ

связи с чем большое значение имеет применение приближенных инженерных методов, рассчитанных на использование ЭВМ. Матричная форма расчета колец на ЭВМ дает возможность свести к минимуму затраты труда на программирование и обеспечить общность расчетов для различных размеров колец и условий нагружения, позволяя также провести исследование таких вопросов, как влияние моментного отпора и учета нелинейности деформирования основания на точность расчетов.

Существующие методы расчета отличаются значительной сложностью, поэтому их построение в форме, доступной для инженеров-конструкторов, знакомых с основами строительной механики, должно способствовать внедрению методов расчета в конструкторскую практику.

**Цель данной работы** состоит в построении метода расчета колец, опирающихся на податливое основание и жесткие опоры, отвечающего современным требованиям с точки зрения необходимой точности, применимости ЭВМ и возможности подбора оптимального варианта конструкции.

**Научная новизна.** Разработан эффективный метод расчета плоских колец, опирающихся на жесткие опоры и податливое основание одновременно. Алгоритм метода, записанный в матричном виде, является единым для замкнутых и разрезных колец и различных моделей податливого основания.

Получено общее решение задачи о деформировании кольца на податливом основании и жестких опорах, нагруженного силами, нормальными к плоскости кольца, и крутящими моментами, учитывающее влияние моментного отпора и различных моделей упругого основания.

Рассмотрены случаи неоднородного основания, основания с нелинейной характеристикой.

Предложен метод использования единых матриц податливости для колец с различными размерами.

Исследованы вопросы влияния моментного отпора на точность расчета, указаны случаи необходимости учета моментного отпора при расчете колец.

Метод расчета колец проверен экспериментально.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** На основании выполненных теоретических исследований разработана единая методика расчета плоских колец (замкнутых и разрезных), опирающихся на жесткие опоры и одновременно на податливое основание, представленное различными моделями. После тщательной экспериментальной про-

верки предлагаемый метод расчета был включен в отраслевой стандарт ОСТ 160.682.004—71 «Трансформаторы и автотрансформаторы силовые. Методы расчета прессующих колец».

С учетом опыта применения методики расчета, включенной в ОСТ 160.682.004—71, в практике предприятий электротехнической промышленности разработан и утвержден усовершенствованный отраслевой стандарт ОСТ 160.800.734—80 «Трансформаторы и автотрансформаторы силовые. Механический расчет прессующих колец» с охватом более широкого круга задач (расчет разрезных и неразрезных колец не только из изотропных, но и из анизотропных материалов при их симметричном и несимметричном нагружении) и описанием алгоритма расчета на ЭВМ.

Внедрение предлагаемой методики расчета прессующих колец силовых трансформаторов на производственном объединении «Запорожтрансформатор» им. В. И. Ленина обеспечило сокращение весовых характеристик этих деталей на 10—12%, способствовало применению взамен маломанитной стали древесно-слоистых пластиков при сокращении времени на расчеты конструкций трансформаторов.

Общая экономия от внедрения предложенной методики расчета на п/о «Запорожтрансформатор» составила 66,8 тыс. рублей.

**Автор защищает** полученные в работе:

— общее решение задачи о деформировании плоского кольца, нагруженного силами, нормальными к плоскости кольца, и крутящими моментами, при опирании на податливое основание и жесткие опоры;

— применение общей методики для случаев различных моделей упругого основания (однородное и неоднородное основание винклеровского типа, упругое полупространство), с распространением и на случай нелинейно деформируемого основания;

— применение общего решения к практически важным частным случаям (симметричная задача для разрезного и неразрезного кольца, опирание только на податливое основание, либо на жесткие опоры);

— выводы о влиянии изменения жесткости основания, моментного отпора и нелинейности деформирования основания на прогибы колец и напряжения в кольцах;

— матричный метод расчета колец на податливом основании и жестких опорах;

— методику экспериментальной проверки расчетов;  
— общую методику инженерного расчета колец на ЭВМ применительно к расчетам колец обмоток трансформатора.

**Апробация.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались на отчетных научно-технических конференциях Запорожского машиностроительного института им. В. Я. Чубаря (1971, 1972, 1973 гг.), на совместном заседании лаборатории механических испытаний Всесоюзного института трансформаторостроения, кафедр «Детали машин» и «Сопrotивление материалов» Запорожского машиностроительного института им. В. Я. Чубаря (Запорожье, 1978 г.), на заседании кафедры строительной механики Харьковского инженерно-строительного института (Харьков, 1978 г.), на научно-теоретическом семинаре кафедры строительной механики Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина (Днепропетровск, 1979 г.).

**Публикация.** По материалам диссертации опубликовано восемь работ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, выводы, список использованной литературы и приложения и изложена на 155 страницах текста, включая 31 рисунок, 2 таблицы и приложения на 21 странице.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается обзор состояния вопроса расчета балок на податливом основании и, в частности, балок, криволинейных в плане, в связи с потребностями конструкторской практики и обосновывается целесообразность разработки метода расчета колец, опирающихся на податливое основание и жесткие опоры, отвечающего современным требованиям.

Анализ литературы показывает, что наиболее полные исследования по расчету колец на податливом основании были проведены проф. А. П. Коробовым и по его методу — доц. А. И. Цюпкало применительно к однородному основанию по Винклеру. Решение получено в рядах. Численные расчеты ограничивались простейшими случаями. Только в расчетах А. И. Цюпкало указывалось на необходимость учитывать влияние моментного отпора при расчете колец. В работах Т. Т. Хачатряна, К. Бицено и Р. Граммеля, С. В. Бояршинова моментным отпором пренебрегали. Единого метода для расчета замкнутых и разрезных колец, пригодного для случаев

опирания кольца на малосвязные основания или на упругое полупространство и на жесткие опоры, предложено не было, не был также рассмотрен случай основания с пелинейной характеристикой.

В **первой** главе излагается постановка задачи и представлены общие уравнения теории расчета кольца на податливом основании и жестких опорах.

В предложенном общем решении рассматриваемой здесь задачи использован метод Б. Н. Жемочкина, который развит и дополнен в соответствии с особенностями деформирования колец в условиях контакта с основанием и жесткими опорами, кроме этого, в решении предусмотрен учет нелинейного деформирования основания, вплоть до пластических деформаций с учетом повторного нагружения.

Наиболее общим является случай замкнутого кольца на податливом основании и жестких опорах. Кольцо разделяется на две половины, каждая из которых рассчитывается как консольная балка, имеющая в плане круговое очертание, то есть одно сечение половины кольца является условно закрепленным (рис. 1), а другое — условно освобожденным от связей. Указанная балка нагружена заданными силами  $P_j$  и моментами  $P_{m+j}$ , где  $j=1,2, \dots, m$ , а  $m$  — число точек приложения нагрузки. Неизвестными являются 3 перемещения условно закрепленного сечения (поворот сечения вокруг касательной к оси балки  $\Omega_0$ , поворот вокруг радиуса, проведенного из центра кривизны в центр сечения кольца  $\Phi_0$ , и поступательное перемещение, перпендикулярное плоскости кольца  $U_0$ ),  $n$  — неизвестных усилий отпора  $X_k$  и  $n$  моментов отпора  $X_{n+k}$ ,  $k=1,2, \dots, n$ , где  $n$  — число расчетных участков, на которые разбивается половина кольца и в центрах которых считаются приложенными усилия и моменты отпора основания; кроме того, неизвестными являются реакции опор и реактивные моменты  $R_l, R_{s+1}, l=1,2, \dots, s$ ;  $s$  — число опор и, наконец, реакции внутренних связей в условно освобожденном от связей сечении кольца,  $M, H$ , и  $Q$  (изгибающий момент, крутящий момент и перерезывающая сила, соответственно).

Составляются уравнения совместности деформаций кольца и основания для каждой из половин кольца, уравнения равновесия (в общем случае для кольца в целом), уравнения, отражающие отсутствие перемещений на жестких опорах и

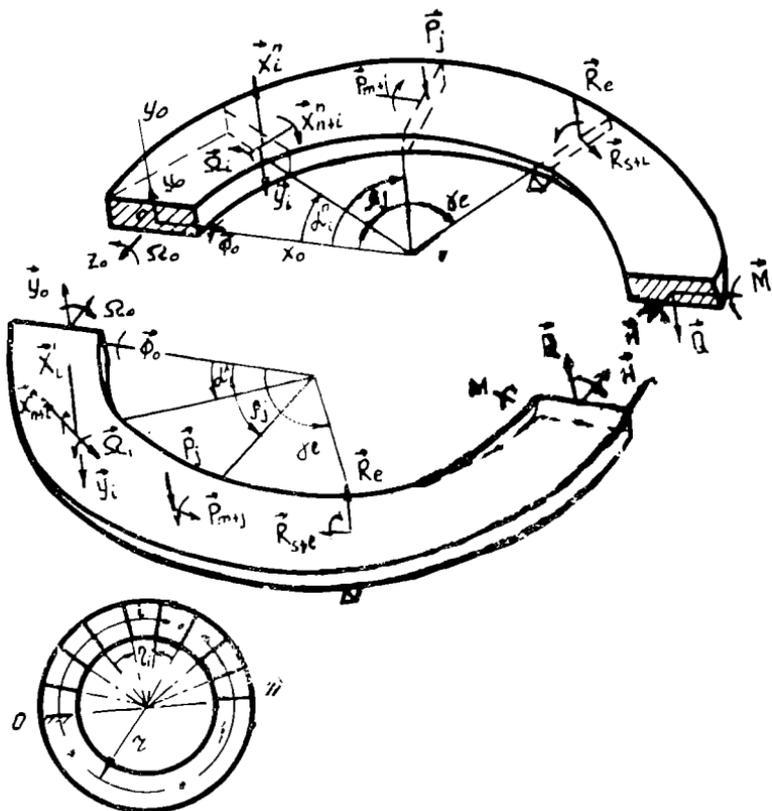


Рис. 1. Общая расчетная схема кольца.

О — условно закрепленное сечение,  $\bar{\pi}$  — условно свободное сечение. Кольцо разбито на участки, отвечающие центральным углам  $\tau_i$ . На рисунке показаны положительные направления силовых факторов и перемещений.

уравнения неразрывности деформаций в сечении, где условно сняты внутренние связи.

При такой форме составления уравнений задача о разрезном кольце будет частным случаем задачи о замкнутом кольце, в котором отсутствуют усилия  $M, H, Q$  во внутренних связях.

Коэффициентами при неизвестных усилиях в уравнениях смешанного метода строительной механики являются возни-



где  $k_i$  — коэффициент постели основания под  $i$ -тым участком кольца,  $b$  — ширина кольца,  $r$  — средний радиус, а  $\gamma_{ii}$  — центральный угол, отвечающий длине участка.

При условии, что  $N_i$ ,  $\Omega_i$  выражаются формулами (3) и (4), уравнения (1) и (2) (и другие уравнения полной системы на  $2n+2n'+2s+2s'+6$  уравнений, составляемых для обеих половин кольца) будут представлять собою систему линейных алгебраических уравнений, к решению которой и сводится расчет кольца.

В том случае, когда упругое малосвязное основание отличается нелинейной характеристикой, то есть связь между давлением отпора  $q$  и осадкой основания  $Y$  выражается некоторой нелинейной функцией  $q=\varphi(Y)$ , задача решалась методом последовательных приближений.

Рассматривается два варианта применения метода последовательных приближений. В первом варианте задаем уравнение  $q=\varphi(Y)$  (рис. 2).

Полная система уравнений решается как для случая линейно-деформируемого основания при коэффициенте постели  $k_{\text{ср.}} = \frac{q_{\text{ср.}}}{Y_{\text{ср.}}}$  где  $q_{\text{ср.}}$  — среднее давление на кольцо, а

$Y_{\text{ср.}}$  — координата точки графика, отвечающая величине  $q_{\text{ср.}}$ . Полученные в первом приближении значения неизвестных  $X_{i1}$ ,  $X_{(i+1)1}$  позволяют определить значения давлений на основание по площади каждого из участков кольца  $q_{i1}$  и отвечающие им по зависимости (3) значения  $Y_{i1}$  точек прямой  $OA_0$ , рис. 2. Если по значениям  $q_{i1}$  подсчитать значения  $Y(q_{i1})$  — значения абсцисс точек пересечения кривой  $q=\varphi(Y)$  с прямыми  $q=q_{i1}$  и определить значения:

$$K_{i2} = \left( \frac{dq}{dY} \right)_{Y=Y(q_{i1})} \quad (5)$$

то для получения решения во втором приближении вместо зависимостей (3) и (4) используются зависимости

$$Y_i = \frac{X_{i1}}{K_{i2} b \gamma_{ii}} + Y(q_{i1}) - \frac{q_{i1}}{K_{i2}} \quad \text{и} \quad \Omega_i = \frac{12 X_{i1}}{K_{i2} b^3 \gamma_{ii}} \quad (6)$$

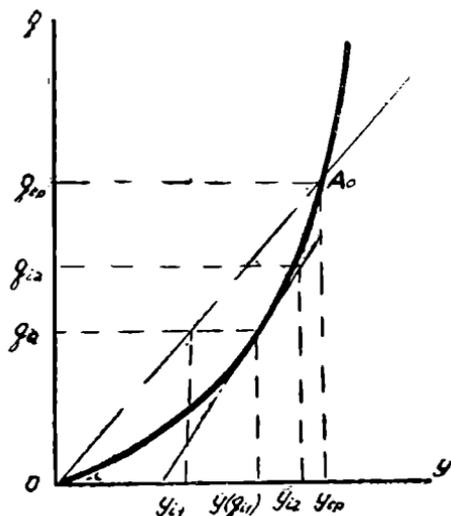


Рис. 2. Кривая, выражающая зависимость между осадкой и давлением отпора нелинейно-деформируемого основания.

система уравнений решается вторично, вычисляются значения  $q_{i2}$ ,  $y_{i2}$  (точки на касательных к графику функции  $q = \varphi(y)$  и т. д. Часто третье приближение практически не отличается от второго (погрешность 3—4%).

Второй вариант метода последовательных приближений, как показано в работе, использован и при исследованиях пластической деформации основания с определенным остаточных деформаций при повторном нагружении.

В этом варианте рассматривается упрощенная характеристика основания, изображаемая ломаной из 2-х участков (рис. 3). Расчет производится по методу проб и итераций Рабиновича—Абрамова. На первой стадии расчета предполагается, что для всех участков осадка основания не превышает  $y_L$  (давление —  $q_L$ ). Критерием появления текучести является неравенство:

$$\mu = \frac{X_i + \frac{\sigma}{\delta} X_{n+i}}{q_i \delta z z} > 1 \quad (7)$$

Для  $U_i$  и  $\Omega_i$ , вычисляемых при  $k_i = k_1$ , решается система уравнений. Составляются отношения  $\mu_j$ , среди них выбирается наибольшее, пусть это будет  $\mu_a$ ; если, к тому же,  $\mu_a > 1$ , то в уравнениях системы принимается

$$U_a = \frac{X_a}{k_2 \beta^2 \eta_a} \quad \frac{q_c - k_2 U_a}{k_c} \quad \Omega_a = \frac{12 X_{n+1}}{k_3 \beta^2 \eta_a} \quad (8)$$

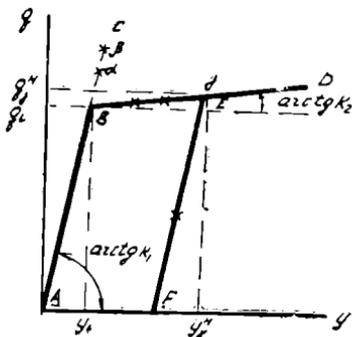


Рис. 3. К расчету остаточных деформаций основания.

Затем производится повторное решение системы. Для всех  $X_i$ ,  $X_{n+i}$  (исключая номер  $x$ ) выбирается максимальное отношение  $\mu_i$  и т. д. Счет продолжается до тех пор, пока все отношения  $\mu_i$  с номерами, для которых не было произведено изменение уравнений, не станут меньше 1.

При опирании кольца на упругое полупространство

$$U_i = \sum \bar{U}_{ix} X_x \quad (9)$$

т. е. для решения задачи требуется вычислить матрицу осадок от единичных усилий.

Диагональные элементы этой матрицы определяются по известной формуле:

$$U_{ii} = \frac{1 \cdot M_c^2}{\pi E_0 \beta} 2 \left\{ \ln \frac{1}{\xi} + \frac{1}{\xi} \left[ \xi + \sqrt{\xi^2 + 1} \right] + \ln \left[ 1 + \sqrt{\xi^2 + 1} \right] \right\}$$

где  $\xi = \frac{r \gamma_{ij}}{b}$  — отношение длины участка к ширине кольца, а  
 побочные — по выведенной приближенной зависимости

$$y_{ik} = \frac{1 - \mu_0^2}{\pi E_0} \frac{1}{2r_0} \rho_n \left| \begin{array}{c} \operatorname{tg} \frac{\alpha_k + \frac{2k}{2} - \alpha_i}{4} \\ \operatorname{tg} \frac{\alpha_k - \frac{2k}{2} - \alpha_i}{4} \end{array} \right| \quad i \neq k$$

Между углом закручивания и моментом отпора принимается известная зависимость

$$\Omega_i = \frac{\chi_{n_i} \sqrt{F(1 - \mu_i^2)}}{\omega_\varphi \gamma E}$$

где  $\omega_\varphi$  — коэффициент, зависящий от соотношения  $\frac{b}{2r_0}$ ,  $F = 6\gamma r_0^3$ ,

$$\gamma = \frac{9}{12} \gamma r_0^3$$

Во **второй** главе рассмотрены практически важные частные случаи задачи о расчете кольца на податливом основании и жестких опорах.

Рассматриваются симметричная задача для замкнутого и разрезного кольца, задача для кольца на податливом основании без жестких опор и для кольца, опирающегося только на жесткие опоры.

Для вычисления коэффициентов уравнений системы требуется составление особых программ, их вычисление занимает гораздо больше машинного времени, чем само решение системы уравнений по стандартной программе.

При достаточно большом числе расчетных участков с большой точностью силу  $P_j$ , приложенную в точке с угловой координатой  $\alpha_j$  ( $\alpha_i < \alpha_j < \alpha_{i+1}$ , где  $\alpha_i, \alpha_{i+1}$  — координаты центров соседних расчетных участков, на которые разбито кольцо), можно привести к центрам  $i$  и  $i+1$ , заменив двумя приведенными к центрам участков  $i$  и  $i+1$  нагрузками:

$$N_i = P_j \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_j}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \quad (10)$$

$$N_{i+1} = P_i \frac{\alpha_i - \alpha_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} \quad (11)$$

В этом случае для усилий отпора и нагрузок используется одна и та же матрица коэффициентов.

**Третья** глава посвящена расчету колец на податливом основании с применением матриц.

Рассматривается замена всех уравнений исходной системы, описанных в главах 1 и 2, матричным уравнением. Показаны преимущества применения единых (не зависящих от размеров колец) матриц.

Действительно, даже в том случае, когда для усилий отпора и нагрузок используется одна и та же матрица коэффициентов уравнений, для каждого типоразмера кольца приходится производить вычисление этих коэффициентов, что является операцией, занимающей довольно много машинного времени. Этого можно избежать, если ввести, наряду с приведением нагрузок, построение единых составляющих матрицы коэффициентов для колец любого размера с последующим умножением заранее построенных элементов матрицы на скаляры (при заданных размерах кольца) и сложения.

Для примера рассмотрим расчет разрезного кольца на податливом основании при пренебрежении моментным отпором в условиях симметричной задачи.

В этом случае уравнения (2) не составляются, а уравнения (1) могут быть представлены в виде:

$$\sum_{k=1}^n \delta_{ik} X_k + \Omega_0 z (1 - \cos \alpha_k) + Y_0 + Y_0 = \sum_{k=1}^n \delta_{ik} N_k \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

коэффициенты  $\delta_{ik}$  вычисляются по зависимостям

$$\delta = \frac{z^3}{EJ_k} \left[ \frac{\alpha_i}{2} (\lambda + 1) \cos(\alpha_k - \alpha_i) + \frac{q}{2} (\lambda - 1) \sin \alpha_i \cos \alpha_k + \lambda \alpha_i - \lambda \sin \alpha_i - \lambda \sin \alpha_k + \lambda \sin(\alpha_k - \alpha_i) \right], \quad \alpha_i < \alpha_k \quad (13)$$

где  $\lambda$  — отношение изгибной и крутильной жесткостей сечения кольца.

Добавляя к уравнению совместности деформаций уравнение равновесия (нагрузка осуществляется только силами)

$$\sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n N_i \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i r (1 - \cos \alpha_i) = \sum_{i=1}^n N_i r (1 - \cos \alpha_i) \quad (15)$$

и принимая

$$X_{n+1} = \frac{\Omega_0 E J_x}{r^2} \quad X_{n+2} = \frac{y_0 E J_x}{r^3} \quad (16)$$

можем заменить систему n+2 уравнений (12), (14), (15) на одно матричное уравнение

$$(\Delta + Y) \vec{X} = \Delta \vec{N} \quad (17)$$

где  $\Delta$  — матрица коэффициентов уравнений,  $Y$  — матрица значений  $U_i$ ,  $\vec{X}$  и  $\vec{N}$  — матрицы-столбцы неизвестных величин и приведенных нагрузок, соответственно.

Матрица  $\Delta$  может быть представлена в виде линейной комбинации матриц  $A'$  и  $A''$

$$\Delta = (A' + \lambda A'') \frac{r^3}{E J_x}$$

где элементы каждой из матриц  $A'$  и  $A''$  не зависят от размеров колец. Операция сложения матриц отнимает в десятки раз меньше времени, чем их вычисление.

Рассмотрены также примеры расчета колец с вырезами и колец на жестких опорах по единому алгоритму и программе, колец на упругом винклеровском основании, имеющих только тонкий разрез.

Если кольцо имеет жесткую опору на каком-то Р-том участке, можно на этом участке положить  $U_p = 0$  (участок основания с бесконечно большим коэффициентом постели), наоборот, если рассматривается только часть кольца, то на участках, попадающих в вырез, можно считать коэффициент постели

ли как угодно малым, т. е. взять значения  $U_i$  весьма большими. В работе описано вычисление внутренних силовых факторов и напряжений в сечениях кольца при помощи матриц.

В **четвертой** главе исследовалось влияние изменения жесткости основания, моментного отпора и нелинейности деформирования основания на прогибы колец и напряжения в кольцах, причем эти вопросы представляют не только теоретический, но, главным образом, практический интерес.

Были просчитаны для сравнения с предложенным методом простые задачи, решенные А. И. Циопкало по методу А. П. Коробова. Результаты расчетов совпали. Использование ЭВМ позволило просчитать ряд вариантов, из анализа которых сделан вывод о том, что моментный отпор следует учитывать при расчете кривых брусьев с отношением  $v/g < 1/8$ . Кольца с отношением  $v/g < 1/8$  и с малым вырезом (или замкнутые) при винклеровском основании можно рассчитывать без учета моментного отпора.

Приведены графики влияния жесткости основания на значения прогибов и напряжений в кольцах, часть из них показана на рис. 4 (кольцо с узким разрезом, нагружено 4 силами в центрах 4,5 и 20, 21 участков,  $n=24$ ).

Показано, что учет нелинейности деформирования основания может повышать при определенных условиях точность расчета на 8—10%.

Рассмотрен вопрос о расчете кольца с учетом отрыва от основания.

**Пятая** глава посвящена экспериментальной проверке расчетов и практическому приложению результатов работы.

Приводится описание установки для нагружения колец диаметром 0,8—1,5 м. Результаты эксперимента сравнивались с расчетными. Максимальные погрешности упрощенного расчета (без учета нелинейности деформирования основания) составляли 5—20%. Учет нелинейности деформирования основания приближает расчетную кривую к экспериментальной (рис. 5). Показан порядок расчета колец для практического использования.

В **приложении** приведены результаты исследования влияния реактивных крутящих моментов в кривом бруссе, лежащем на упругом основании, путем решения дифференциального уравнения изогнутой оси бруса, а также блок-схема формирования матриц и расчета прессующего кольца на ЭВМ.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Дано общее решение задачи о деформировании плоского кольца, нагруженного силами, нормальными к плоскости кольца, и крутящими моментами при произвольном распределении нагрузок.

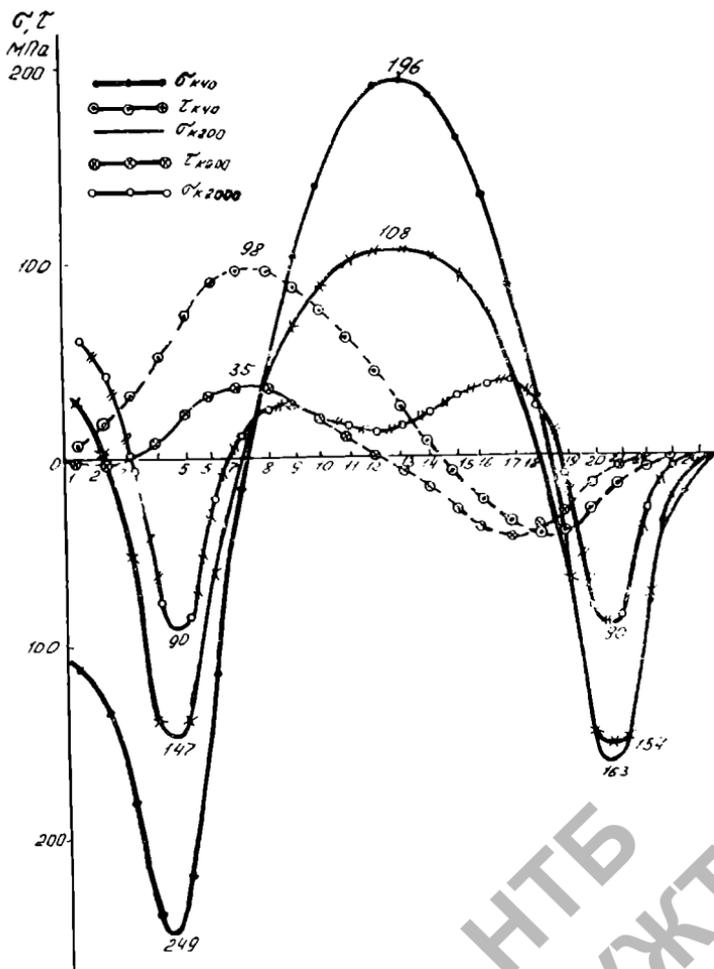


Рис. 4. Эпюры напряжений для кольца при различных коэффициентах постели основания.

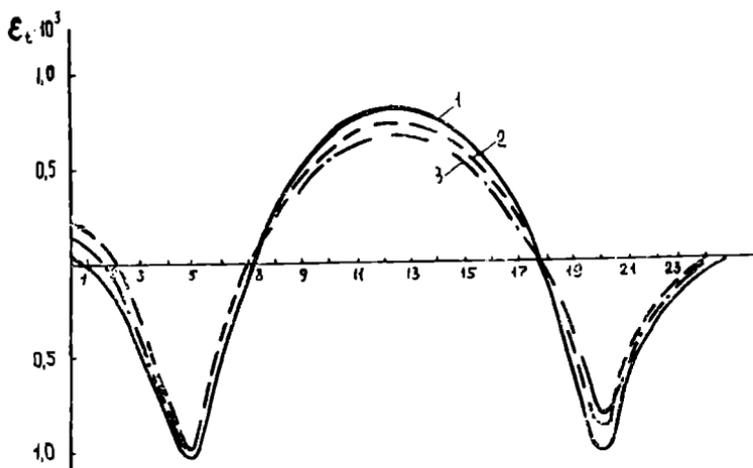


Рис. 5. Эпюры тангенциальных деформаций.

Кривая 1 — Расчет без учета нелинейности характеристики основания.

Кривая 2 — Уточненный расчет.

Кривая 3 — Эксперимент.

Общие уравнения этого решения учитывают:

— опирание кольца на податливое основание и одновременно на жесткие опоры;

— влияние не только силовой вертикальной нагрузки, но и моментного отпора (реактивных крутящих моментов) основания;

— различные модели податливого основания: однородное и неоднородное основание винклеровского типа, упругое полупространство.

2. Полученное решение распространено на случай нелинейно деформируемого основания по модели Винклера.

3. Рассмотрен случай применения полученного решения к расчету кольца при упруго-пластической деформации основания.

4. Получены вытекающие из общего решения упрощенные расчетные уравнения для важных частных случаев расчета колец:

- симметричной задачи для замкнутого кольца и кольца с разрезом на податливом основании и жестких опорах;
- симметричной задачи для замкнутого и пезамкнутого кольца на податливом основании без жестких опор;
- симметричной задачи для замкнутого и пезамкнутого кольца на жестких опорах.

5. Преимущества разработанного метода решения в сопоставлении с другими методами состоят в возможности учета многочисленных практически важных факторов, как-то: произвольное распределение нагрузки, опирание кольца на податливое основание, представляемое различными моделями, и одновременно на жесткие опоры, учет нелинейности основания и других.

6. Разработан матричный метод расчета колец на податливом основании и жестких опорах.

7. Исследованы вопросы необходимости учета влияния моментного отпора.

Показано, что моментный отпор оказывает существенное влияние при расчете коротких широких брусьев ( $v/g > 1/8$ ), когда неучет моментного отпора ведет не только к количественному, но и к качественному изменению характера эпюр.

Отмечено, что для брусьев с отношением  $v/g < 1/8$  влиянием моментного отпора можно пренебречь.

8. Проведенная экспериментальная проверка подтвердила правильность предложенного в работе метода расчета колец.

Установлено, что упрощенный расчет (без учета нелинейности характеристики основания) приводит к погрешности 5...20% по сравнению с экспериментом.

Учет нелинейности деформирования основания позволяет повысить точность расчета и, следовательно, расчетную несущую способность конструкции примерно на 10%.

9. Результаты исследования доведены до практического применения, что отражено изданием отраслевого стандарта ОСТ 160.682.004—71 «Методы расчета прессующих колец трансформаторов», внедренного на предприятиях электротехнической промышленности, с последующей разработкой и утверждением усовершенствованного отраслевого стандарта ОСТ 160.800.734—80 «Трансформаторы и автотрансформаторы силовые. Механический расчет прессующих колец», позволяющего внедрить в практику решение более широкого круга задач на

**Основное содержание диссертации опубликовано  
в следующих работах:**

1. **Чернов В. И., Беликов Б. Г.** Расчет прессующих колец силовых трансформаторов. — Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 6 (26), с. 13—16.

2. **Иванченко О. Н., Беликов Б. Г., Чернов В. И.** Механический расчет ярмовых балок трансформатора в режиме опрессовки ярма.— Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 9 (29), с. 8—10.

3. **Чернов В. И., Иванченко О. Н., Ленкова Л. И., Беликов Б. Г.** Расчет прямоугольной плиты на упругом основании с нелинейной характеристикой. — Известия вузов. Строительство и архитектура, 1973, № 9, с. 30—35.

4. ОСТ 160.682.004—71. Трансформаторы и автотрансформаторы силовые. — Методы расчета прессующих колец. — М.: Мин. электротехнич. пром., 1971—129 с. Группа Е64.

5. **Беликов Б. Г., Иванченко О. Н., Ленкова Л. И., Чернов В. И.** Общее решение задачи о расчете кольца на упругом основании при помощи ЭВМ. — Известия вузов. Строительство и архитектура, 1974, № 11, с. 41—47.

6. **Чернов В. И., Иванченко О. Н., Беликов Б. Г., Ленкова Л. И., Никитинев В. К., Илиевская С. А.** Приложение матриц к расчету прессующих колец трансформаторов. — Электротехника, 1975, № 4, с. 53—55.

7. **Чернов В. И., Иванченко О. Н., Ленкова Л. И., Беликов Б. Г., Никитинев В. К.** Расчет балки кругового очертания на нелинейно-деформируемом основании. — В кн.: Сопrotивление материалов и теория сооружений, К., 1974, вып. XXIII, с. 98—105.

НТБ  
ДНУЖТ

8. ОСТ 160.800.734—80. Трансформаторы и автотрансформаторы силовые. Механический расчет прессующих колец. — Взамен ОСТ 160.682.004—71. — М.: Мин. электротехн. пром., 1980. — 21 с. Группа Е64.

---

БЕ 05307. Подписано в печать 11.08.80. Формат 60x84 1/16.

Объем 1,125 п. л. Заказ № 6897. Тираж 100 экз.

---

Типография изд-ва «Коммунар», Запорожье, пр. Ленина, 152.