



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

М.ТЫНЫШПАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҚӨЛК ЖӘНЕ КОММУНИКАЦИЯЛАР АКАДЕМИЯСЫ  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ ИМ. М. ТЫНЫШПАЕВА»

**МАТЕРИАЛЫ**  
международной научно-практической  
конференции  
**«НАУКА И ИННОВАЦИИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ  
ТРАНСПОРТЕ»**

**ТОМ 4**



**АЛМАТЫ**  
2007





«ҚАЗАҚСТАН ТЕМІР ЖОЛЫ» ҰЛТТЫҚ КОМПАНИЯСЫ  
АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ

ҚР ЖОҒАРЫ ОҚУ ОРЫНДАРЫ АССОЦИАЦИЯСЫ

«М. ТЫНЫШПАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ КӨЛІК ЖӘНЕ  
КОММУНИКАЦИЯЛАР АКАДЕМИЯСЫ» АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ

## «ТЕМІР ЖОЛ КӨЛІГІНДЕГІ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ИННОВАЦИЯЛАР»

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТӘЖІРИБЕЛІК  
КОНФЕРЕНЦИЯСЫНЫҢ

МАТЕРИАЛДАРЫ

*ТОМ 4*

АЛМАТЫ  
2007

ББК 39.20-06

Н34

Редакция алқасы:

С.А. Алпысбаев - бас редактор, Р.Қ. Сатова - бас редактордың орынбасары, редколлегияның мүшелері: В.З. Васильев, Н.К. Исингарин, Э.П. Исаенко, С.М. Біттібаев, Е.А. Исаханов, М.А. Кобдиқов, С.Е. Бекжанова, Е.Е. Қарсыбаев, В.Г. Солоненко, М.С. Кульгельдинов, Б.А. Белгібаев, Е.Т. Әуесбаев, М.Д. Зальцман, Н.М. Махметова, С.Х. Достанова, Т.Д. Абақанов, М.Б. Имандосова, Т.К. Қойшиев, Ш.Б. Биттеев, И.Т. Өтепбергенов, Н.Т. Смағұлова, Т.Б. Баяхметов, Н.Н. Ыбрышев, А.А. Истаева, С.К. Мырзалы, А.Д. Мұстапаева

Н 34 «Темір жол көлігіндегі ғылым және инновациялар»: Халықаралық ғылыми-практ. конф. 6-7 желтоқсан 2007 ж. Алматы: ҚазККА баспасы, 2007. Т. 4.-289б.: ил. 60.

ISBN 978-601-207-032-3

Мақалаларда көліктің, көлік инфрақұрылымының даму, көлік дәліздерінің қалыптасу, көлік-коммуникациялық кешені үшін мамандар дайындау мәселелері, сонымен қатар мемлекет ішінде және мемлекеттер арасында үйлесімді және ұтымды көлік байланыстарының даму перспективалары, көліктік жүйенің интеграциясы және техникалық дамыту қарастырылған.

Ғылыми және инженер - техникалық қызметкерлер, көлік және техникалық жоғары оқу орындарының студенттері мен оқытушыларына, аспиранттарына, көлік саласындағы кәсіпорындар мен ұйымдардың жетекшілері мен мамандарына арналған.

ББК 39.20-06

«М. Тынышпаев атындағы Қазақ көлік және коммуникациялар академиясы» АҚ, 2007

ISBN 978-601-207-032-3 - Т.6

978-601-207-028-6



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАЦИОНАЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «ҚАЗАҚСТАН ТЕМІР ЖОЛЫ»

АССОЦИАЦИЯ ВУЗОВ РК  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
КАЗАХСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
ИМ. М. ТЫНЬШПАЕВА

**МАТЕРИАЛЫ**  
**Международной научно-практической**  
**конференции**

**«НАУКА И ИННОВАЦИИ**  
**НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»**

*Том 4*

Алматы  
2007

ББК 39.20-06

Н 34

**Редакционная коллегия:**

С.А.Алпысбаев – главный редактор, Р.К.Сатова - заместитель главного редактора, члены редколлегии: В.З.Васильев, Н.К.Исингарин, Э.П.Исаенко, С.М.Биттибаев, Е.А.Исаханов, М.А.Кобдилов, С.Е.Бекжанова, Е.Е.Карсыбаев, В.Г.Солоненко, М.С.Кульгельдинов, Б.А.Бельгибаев, Е.Т.Ауесбаев, М.Д.Зальцман, Н.М.Махметова, С.Х.Достанова, Т.Д.Абаканов, М.Б.Имандосова, Т.К.Койшиев, Ш.Б.Биттеев, И.Т.Утепбергенов, Н.Т.Смагулова, Т.Б.Баяхметов, Н.Н.Ибришев, А.А.Истаева, С.К.Мырзалы, А.Д.Мустапаева

Н 34 «Наука и инновации на железнодорожном транспорте»: Междунар. науч.-практ. конф. 6-7 декабря 2007 г. г. Алматы: Изд-во КазАТК, 2007.  
Т. 4, - 289 с.: ил. 106.

ISBN 978-601-207-026-2

В статьях рассмотрены проблемы развития транспорта, транспортной инфраструктуры, формирования транспортных коридоров, подготовки кадров для транспортно-коммуникационного комплекса, а также перспективы развития гармоничных и благоприятных внутригосударственных и межгосударственных транспортных связей, вопросы технического развития и интеграции транспортных систем.

Предназначен для широкого круга научных и инженерно-технических работников, аспирантов и студентов транспортных и технических ВУЗов, руководителей и специалистов транспортных предприятий и организаций.

**ББК 39.20-06**

АО «Казахская академия транспорта  
и коммуникаций им.М.Тынышпаева, 2007

ISBN 978-601-207-027-9 - Т.4  
978-601-207-028-6

Васильев В.З. - д.т.н., профессор ПГУПС (Россия, Санкт-Петербург)  
Мишин М.В. – аспирант ПГУПС (Россия, Санкт-Петербург)

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЯ ВБЛИЗИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВЫРЕЗА С ПОДАТЛИВЫМ ПОДКРЕПЛЕНИЕМ.

### 1. ПОСТАНОВКА И ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В данной работе рассмотрена задача о деформации слоя с цилиндрическим вырезом, подкрепленным податливым включением. Показана возможность сведения решения к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, которую можно численно реализовывать. Приведены численные результаты для варианта нагружения нормальными силами, распределенными равномерно по площади кольца.

К настоящему времени данная задача изучена достаточно подробно в работах Айзенберга Д.Ю. и Шапиро Г.С., Гринченко В.Т. и Улитко А.Ф., а также в трудах зарубежных авторов: Stenberg E., Sadowsky M.A., Reiss E.L.. Васильевым В.З. решена первая основная задача для слоя с вырезом. Невзоровым Н.И. рассмотрена деформация плиты с упругим включением в виде оболочки. И не смотря на такую популярность, задача до конца не изучена. Прежде всего, отсутствуют исчерпывающие численные результаты по характеру объемного напряженно-деформированного состояния вблизи включения. Как следствие, в настоящее время нет соответствующей программы для ЭВМ, доступной для расчетов любому инженеру-пользователю. Поэтому детальное изучение данной задачи имеет важный научно-технический интерес, тем более, что полученные результаты, как аналитические, так и численные, могут быть использованы при решении более сложных задач (слоистая система и т.д.)

Соответствующая расчетная схема, отвечающая варианту четного нагружения слоя относительно плоскости  $z=0$ , представлена на рисунке 1.

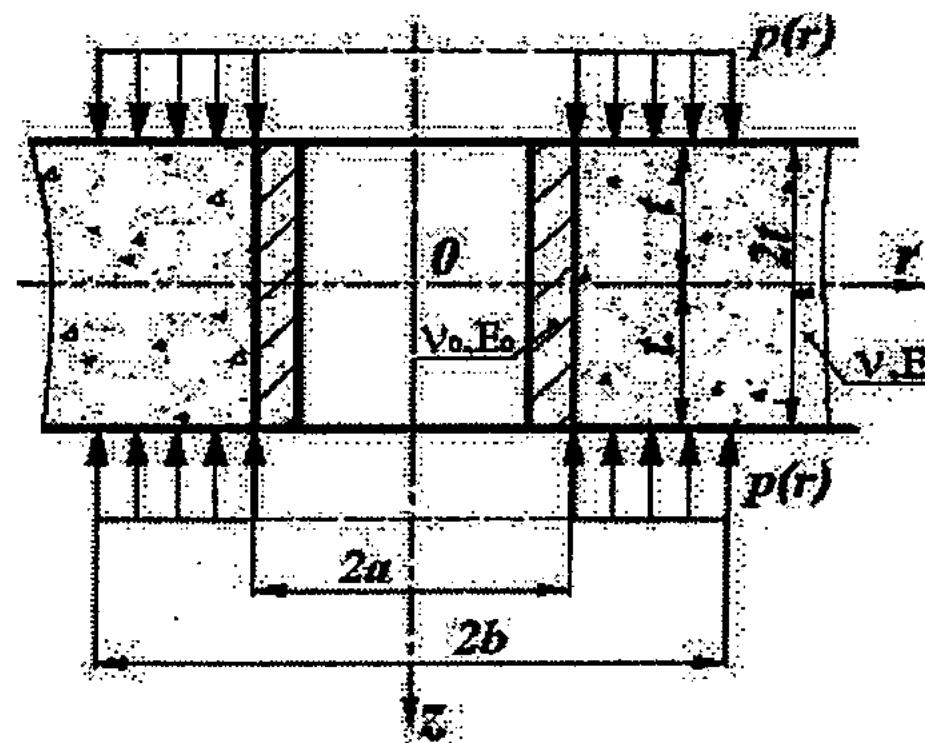


Рисунок 1. Расчетная схема для слоя с цилиндрическим вырезом.

Граничные условия задачи записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= p(r), \quad \tau_{rz} = 0; \quad z = -t, \quad a \leq r < \infty, \\ \sigma_z &= p(r), \quad \tau_{rz} = 0; \quad z = +t, \quad a \leq r < \infty, \\ \sigma_r &= f(z), \quad \tau_{rz} = 0; \quad r = a, \quad 0 \leq z < \infty. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $2t$  – толщина слоя. Начало цилиндрической системы координат выбрано так, что срединная плоскость слоя совпадает с плоскостью  $z = 0$ , а ось  $z$  совпадает с осью выреза. Функция  $p(r)$  предполагается представима в виде интеграла Фурье – Бесселя, а  $f(z)$  – в виде тригонометрических рядов в промежутке  $-t \leq z \leq +t$ .  $f(z)$ .

неизвестные контактные напряжения, которые возникают на поверхности контакта деформируемого слоя и подкрепления. Для отыскания функции  $f(z)$  используется условие совместности радиальных перемещений включения и слоя:

$$F(z) = u(z), \quad -t \leq z \leq +t, \quad (2)$$

где:  $F(z)$  — радиальное перемещение включения;  $u(z)$  — радиальное перемещение цилиндрического отверстия.

Связь между давлением на крепь и ее перемещением принимается известной и заданной в виде:

$$F_c(\lambda) = \psi(\lambda) \cdot f_c(\lambda), \quad 0 \leq \lambda < \infty; \quad (3)$$

$\psi(\lambda)$  — некоторая заданная функция, а  $F_c(\lambda)$  и  $f_c(\lambda)$  — интегральные косинус-трансформанты от  $F(z)$  и  $f(z)$ .

$$F_c(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} F(z) \cos \lambda z \cdot dz, \quad f_c(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} f(z) \cos \lambda z \cdot dz$$

Решение задачи сводится к бесконечной системе следующего вида:

$$A_n^* = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_{i,n} A_i^* + a_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad (4)$$

где

$$\alpha_{i,n} = \frac{32(\lambda_n a)^2 a K_1(\lambda_n a)}{\pi^2 t F_2(\lambda_n a)} \int_0^{\infty} \frac{(\lambda_i a)^2 [(\gamma a)^2 + (\lambda_i a)^2]^2 (\gamma a)^2 \operatorname{sh}^2 \gamma t d(\gamma a)}{[(\gamma a)^2 + (\lambda_n a)^2]^2 [J_1^2(\gamma a) + Y_1^2(\gamma a)] (\operatorname{sh} \gamma t \operatorname{ch} \gamma t + \gamma t)}; \quad (5)$$

$$a_n = \frac{\lambda_n a K_1(\lambda_n a)}{F_2(\lambda_n a) \cos \lambda_n t} \cdot a f_{c,n} + \frac{8(\lambda_n a)^2 K_1(\lambda_n a)}{\pi F_2(\lambda_n a)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma a p^*(\gamma) \operatorname{sh}^2 \gamma t d(\gamma a)}{[(\gamma a)^2 + (\lambda_n a)^2]^2 (\operatorname{sh} \gamma t \operatorname{ch} \gamma t + \gamma t)};$$

$p^*(\gamma)$  — трансформанта Вебера от функций внешних нагрузок.

$$p_m(r) = \int_0^{\infty} p_m^*(\gamma) W_0(\gamma, r) \gamma d\gamma;$$

$$p_m^*(\gamma) = [J_1^2(\gamma a) + Y_1^2(\gamma a)]^{-1} \int_a^{\infty} p_m(r) W_0(\gamma, r) r dr; \quad m = 1; 2.$$

Косинус-трансформанта  $f_{c,n}$  от функции  $f(z)$  определяется из условия (1), и

$$\zeta = \frac{\xi \cdot E}{E_0}$$

выражается через безразмерную величину  $\zeta$ , являющуюся своего рода относительной податливостью:

$$f_{c,n} = \left[ \frac{\lambda_n a K_1(\lambda_n a) a}{F_2(\lambda_n a) \cos \lambda_n t} + \frac{\zeta a}{2(1-\nu^2) \cos \lambda_n t} \right]^{-1} \cdot \frac{8(\lambda_n a)^2 K_1(\lambda_n a)}{\pi F_2(\lambda_n a)} \int_0^{\infty} \frac{P(\gamma) \cdot \gamma a \cdot \operatorname{sh}^2 \gamma t \cdot d(\gamma a)}{[(\gamma a)^2 + (\lambda_n a)^2]^2 (\operatorname{sh} \gamma t \operatorname{ch} \gamma t + \gamma t)};$$

$\xi$  — безразмерный параметр, вытекающий из решения Ламе.

$$\xi = \frac{(1-\nu_0) a^2}{2Rt} \left[ 1 + \frac{1+\nu}{1-\nu_0} \left( \frac{a-t}{a} \right)^2 \right] \quad (6)$$

В работе /3/ Васильевым В.З. была доказана регулярность приведенной выше бесконечной системы (4) и проведена численная реализация задачи для слоя с отверстием без подкрепления.

Изложенное аналитическое решение позволяет исследовать объемное напряженно-деформированное состояние вблизи включения при произвольном нагружении слоя



относительно плоскости  $z=0$ . Однако, использование полученного решения инженерами - расчетчиками, вне всякого сомнения, возможно только при наличии простой для освоения и удобной для использования программы. Поэтому, автором была составлена программа для Windows, на языке Delphi, которая на самом современном уровне использует принципы объектно-ориентированного программирования. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

В этом случае мы можем снять тот разрыв, который до настоящего времени существует между точными аналитическими подходами и возможностями их реального использования в инженерных расчетах.

Эффективность работы программы показана на примере задачи о нагружении слоя нормальными силами, распределенными равномерно по площади кольца. Грузовая функция  $p(r)$  была задана в следующем виде:

$$p(r) = \begin{cases} 0, & a \leq r \leq 2a; \\ p_0, & 2a \leq r \leq 2,67a; \\ 0, & 2,67a < r < \infty. \end{cases} \quad (7)$$

Через  $P_0$  обозначена некоторая константа, имеющая размерность напряжения. Соответственно все числовые результаты по напряжениям даны в долях от  $P_0$ . В

расчетах принято  $\nu = 0,3, \frac{t}{a} = 1$ .

Основными результатами работы являются:

1. Решена задача для слоя с цилиндрическим вырезом, подкрепленным податливым включением, при четном нагружении сводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений.
2. Разрешающая система уравнений является регулярной, тем самым обеспечивается возможность применения метода последовательных приближений для численной реализации задачи при гарантированной сходимости процесса.
3. Составлена программа, которая на базе современных персональных компьютеров позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние слоя с цилиндрическим ослаблением.
4. С помощью данной программы произведено численное исследование напряженно-деформированного состояния слоя вблизи подкрепленного выреза от действия нормальных сил равномерно распределенных по площади кольца.

#### Литература

1. Айзенберг Д.Ю., Шапиро Г.С. О передаче давления через слой, имеющий цилиндрическое отверстие. М.: Инж. сб., 1950, № 7.
2. Васильев В.З., Агуф Е.И. Первая основная задача для слоя с круговым отверстием. - М.: Известия Академии Наук СССР. Механика Твердого Тела, 1980. - с. 68-77.
3. Васильев В.З. Применение метода неполных решений в случае первой основной задачи для полубесконечного цилиндра. Тр. ЛИСИ, 1973, № 73, С. 23.
4. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф. Точное решение задачи о распределении напряжений около кругового отверстия в упругом слое// Прикладная механика. Киев. 1968, Т.4, В. 10, С. 38-45.
5. Невзоров Н.И. Осесимметричная деформация плит с упругим включением: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Л., 1990.
6. Reiss E.L. Extention of an Infinite Plate with a Circular Hole. J. Soc. Industr. and Appl. Math., 1963, vol.11, No. 4.
7. Sternberg E. Three dimensional stress concentration in the theory of elasticity. Appl.



Mech. Revs, 1958, 11, p. 1-4.

**Васильев В.З.** - д.т.н., профессор ПГУПС (Россия, Санкт-Петербург)  
**Мишин М.В.** - аспирант ПГУПС (Россия, Санкт-Петербург)

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
 СОСТОЯНИЯ СЛОЯ ВБЛИЗИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВЫРЕЗА  
 С ПОДАТЛИВЫМ ПОДКРЕПЛЕНИЕМ.  
 2. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ  
 МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**

Процесс численной реализации задачи основан на использовании метода последовательных приближений, подробно изложенного в работах В.З. Васильева. Сутью данного метода является следующее: на каждом шаге приближения контролируется поведение конкретной физической величины; итоговое значение равно сумме всех пошаговых значений. В нашем случае, во всех расчетах количество приближений принималось не менее 10. Граничные условия при этом удовлетворялись с точностью до 5%. Численное интегрирование проводилось в конечном промежутке с верхним пределом не ниже 100, шаг интегрирования по помощи квадратурной формулы Гаусса по  $\lambda^a$  и  $\lambda^b$  не превышал 0,05. Это соответствует гарантии в конечных результатах до третьей значащей цифры.

Основной целью исследования было изучение влияния относительной податливости подкрепления  $\zeta$  на характер напряженно-деформированного состояния в слое. Величина  $\zeta$  бралась из достаточно широкого диапазона: от 0,01 до 100. Критерием достоверности полученных результатов является следующее. Если податливость включения устремить к  $\infty$ , то в пределе мы переходим к первой основной задаче для слоя с вырезом, а при  $\zeta \rightarrow 0$ , к случаю абсолютно жесткого крепления. Обе задачи изучены В.З. Васильевым. Следовательно и результаты расчета должны совпадать с приведенными в вышеуказанных статьях. Такое соответствие и было получено. Следует также отметить, что рассматриваемый вид нагружения (7), данным автором исследован не полностью. Получены лишь графики распределения касательных напряжений  $\tau_{rz}$  и нормальных напряжений  $\sigma_\varphi$ . Исследование влияния податливости крепления вообще не производилось. В указанных работах особо подчеркивается трудность численной реализации для данного вида нагружения.

Итак, по указанной выше программе нами найдены в различных сечениях значения компонентов тензора напряжений и проекции вектора полного перемещения при варьировании величины относительной податливости подкрепления рисунках 1-5.

В результате расчетов выяснилось, что из четырех составляющих тензора напряжений наиболее существенно реагирует на изменение относительной податливости подкрепления только нормальное напряжение  $\sigma_r$ . Это хорошо видно на графиках рисунках 4-5. Остальные компоненты тензора напряжений для данной формы нагружения, при изменении  $\zeta$ , меняются незначительно. Поэтому соответствующие графики здесь не представлены.

На рисунке 1 приведены кривые, характеризующие распределение касательных напряжений в слое с вырезом. Видно, что наибольшие значения касательных напряжений появляются в сечении, где обрывается нагрузка и близки к 1/3 от интенсивности нормальной нагрузки  $P_0$ .



Нормальные напряжения  $\sigma_\varphi$  имеют ярко выраженный максимум в зоне действия нагрузки и стремительно убывают за ее пределами. В случае неподкрепленного отверстия максимальное значение  $\sigma_\varphi$ , равное  $0.48p_0$ , реализуется на плоской грани слоя  $\left(\frac{z}{a}=1.0\right)$ , минимальное – в срединной плоскости (рис. 2).

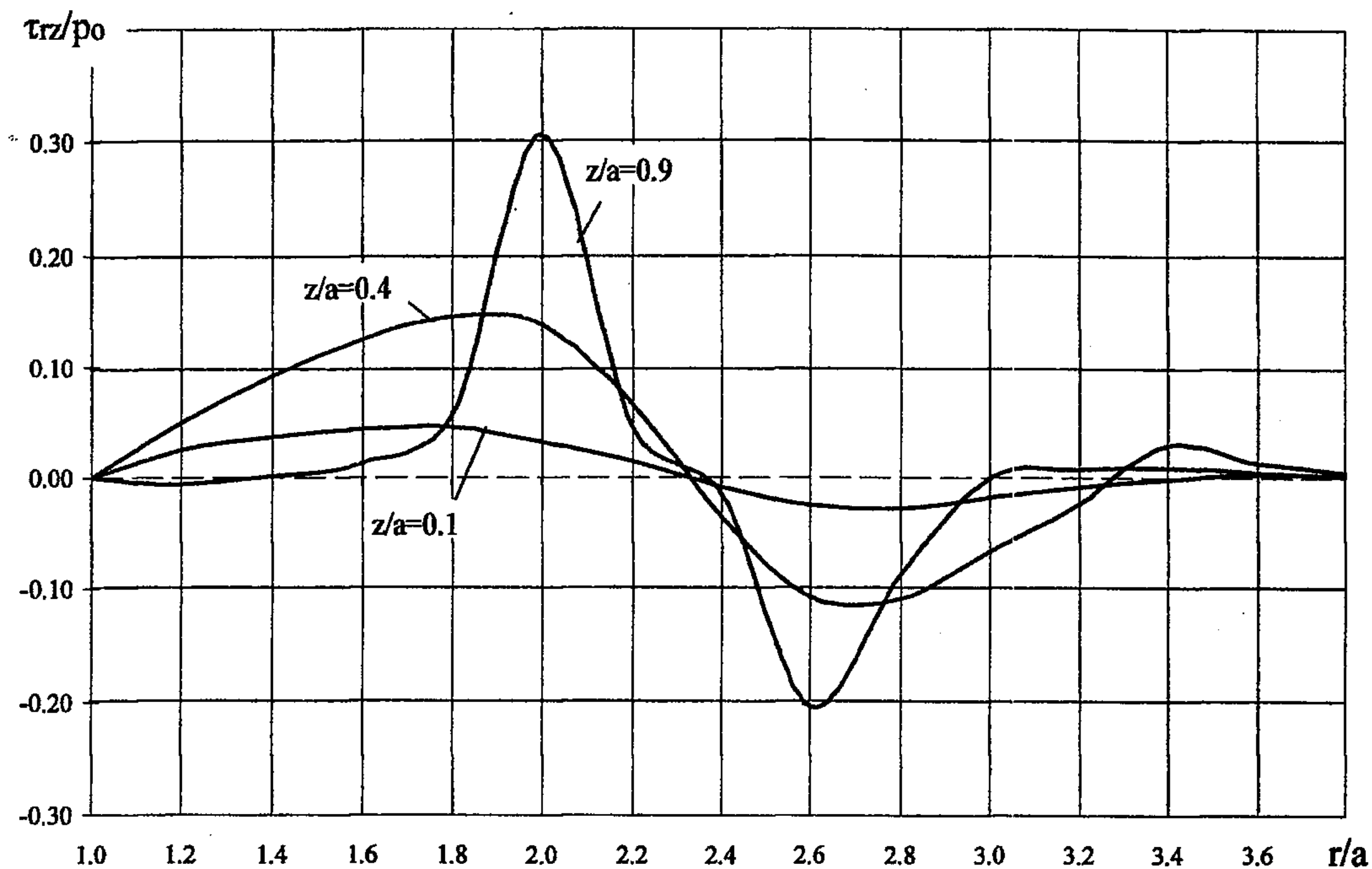


Рисунок 1. Распределение  $\tau_{rz}$  слоя с цилиндрическим вырезом

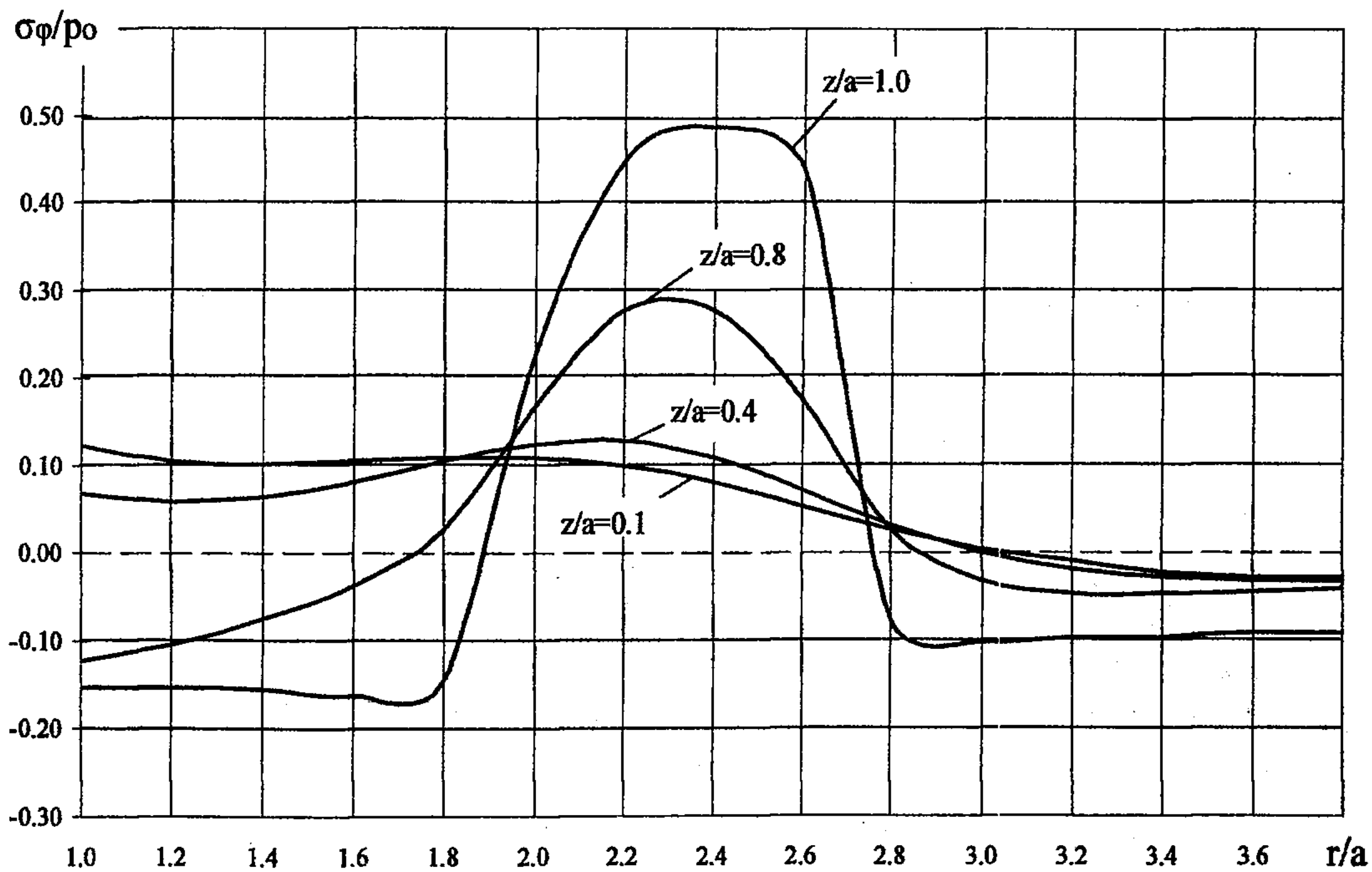


Рисунок 2. Распределение  $\sigma_\varphi$  слоя с цилиндрическим вырезом



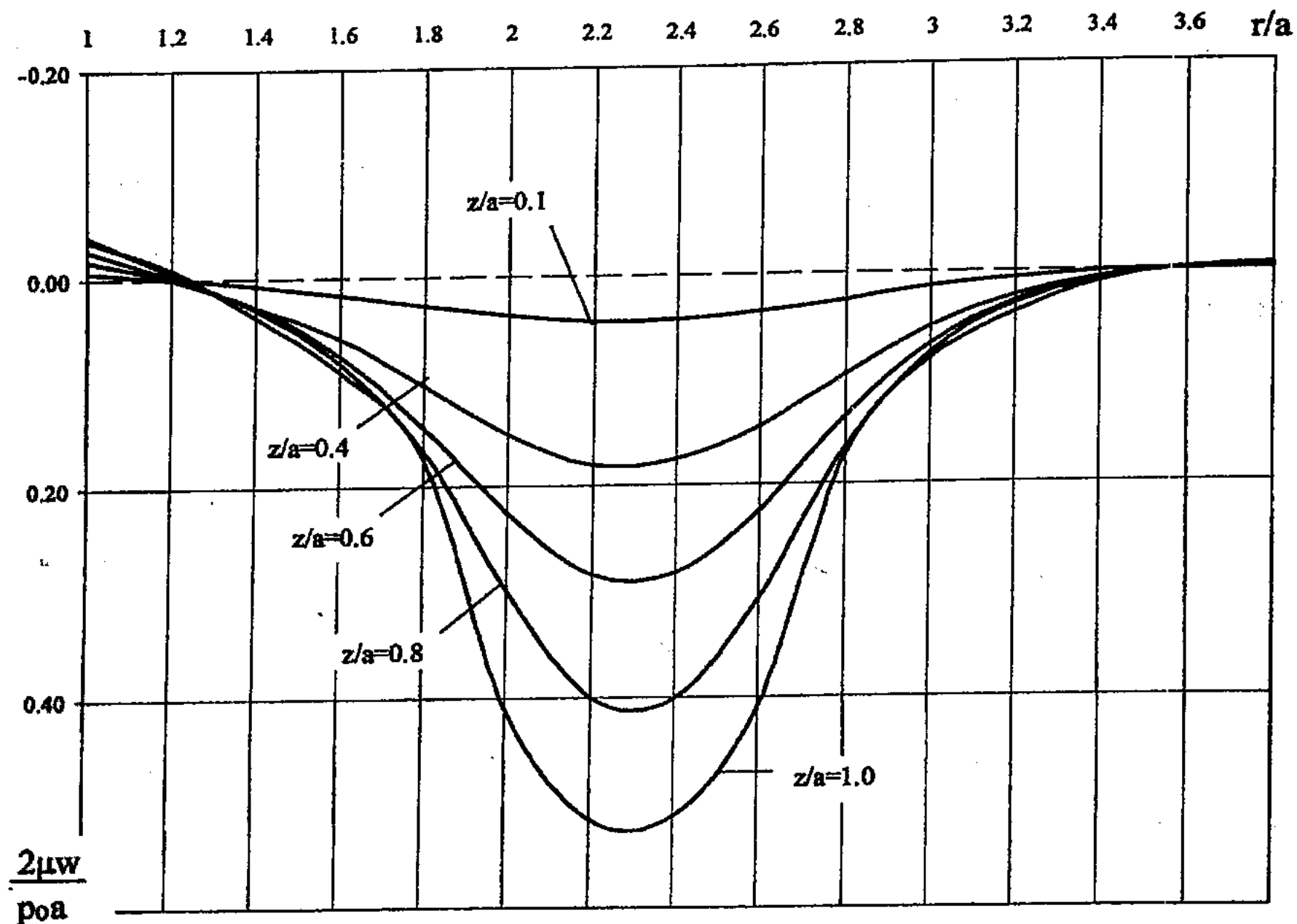


Рисунок 3. Вертикальные перемещения точек слоя с цилиндрическим вырезом

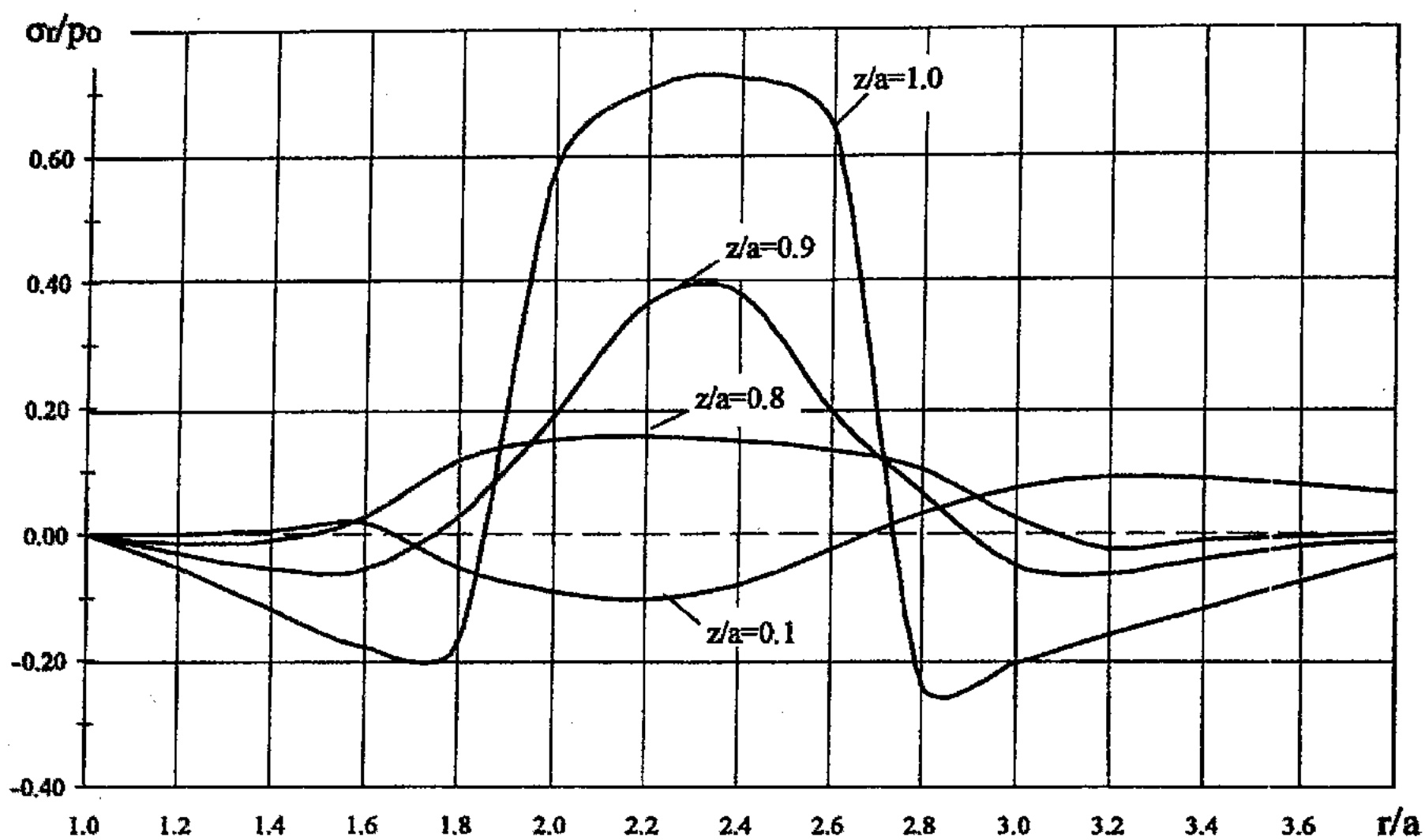


Рисунок 4. Распределение  $\sigma_r$  слоя с цилиндрическим вырезом без подкрепления

При этом на цилиндрической поверхности напряжения становятся знакопеременными. Подобное наблюдается и для напряжений  $\sigma_r$ , которые при  $\frac{r}{a} = 1$  представляют собой давление оказываемое слоем на подкрепление,  $P_0$ . Факт возникновения отрицательных напряжений указывает на то, что на некотором удалении от срединной плоскости слой стремится «оторваться» от крепления. Этот эффект, выявленный В.З. Васильевым, существенно усиливается при наличии подкрепления. Абсолютная величина давления также существенно зависит от величины  $\zeta$ . При  $\frac{\sigma_r}{P_0} = \frac{f(z)}{P_0} = 0$  отсутствии подкрепления давление  $P_0$  (рис. 4). По мере уменьшения податливости  $\zeta$ , давление растет и достигает максимального значения, когда крепление становится абсолютно жестким. Зависимость давления на крепь от ее податливости



представлено графиками на рисунке 6. При этом характер радиальных перемещений  $\frac{2\mu_i}{P_0 a}$

$P_0 a$ , представленных на рисунке 7 полностью соответствует давлению  $P_0$ . При этом искажение цилиндрической поверхности тем меньше, чем выше жесткость крепления.

А для случая, когда  $\zeta = 0$ , переходим к варианту абсолютно жесткого подкрепления, для

которого  $\frac{2\mu_i}{P_0 a} = 0$ .

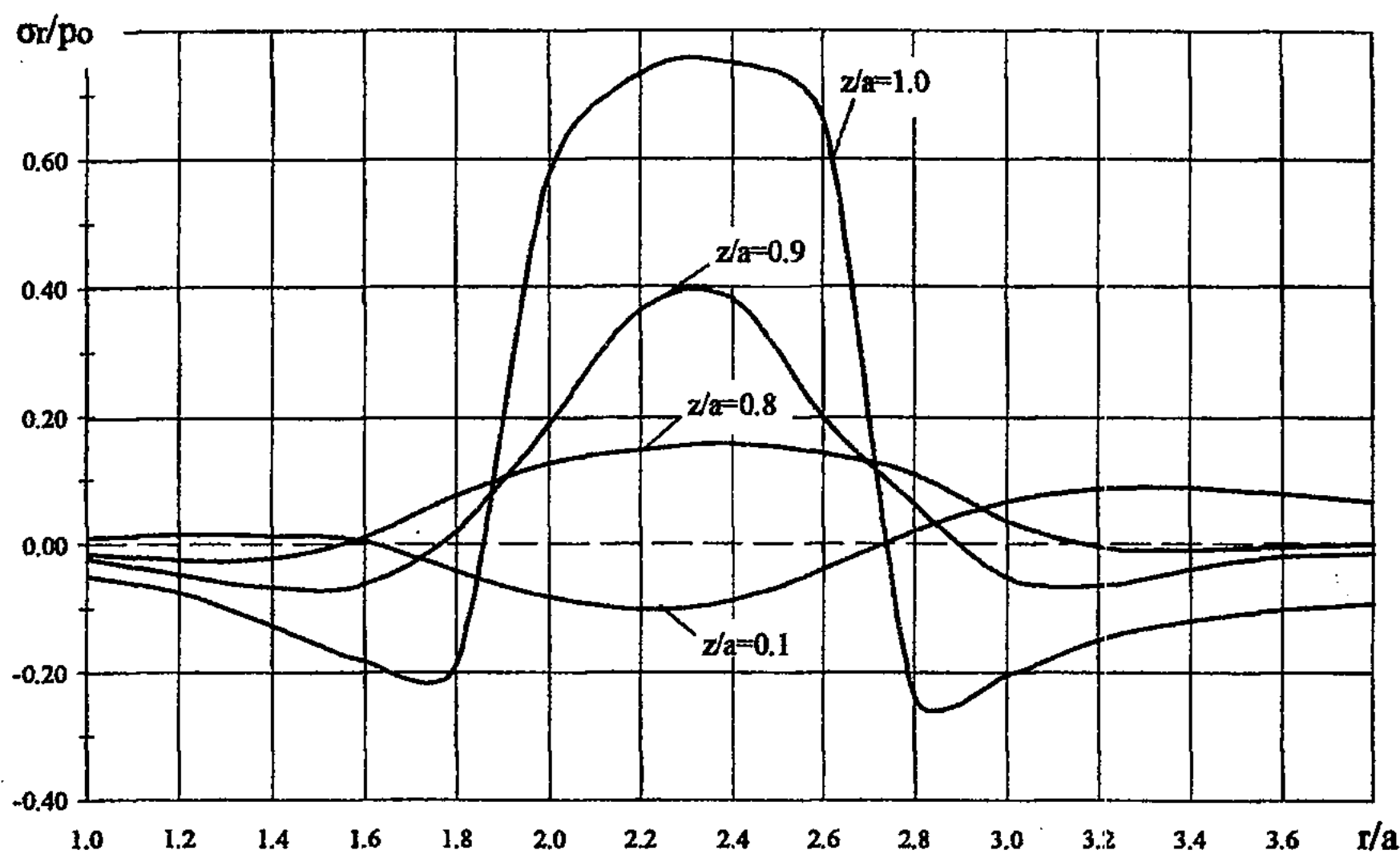


Рисунок 5. Распределение  $\sigma_r$  в слое с подкрепленным цилиндрическим вырезом, при  $\zeta = 10$

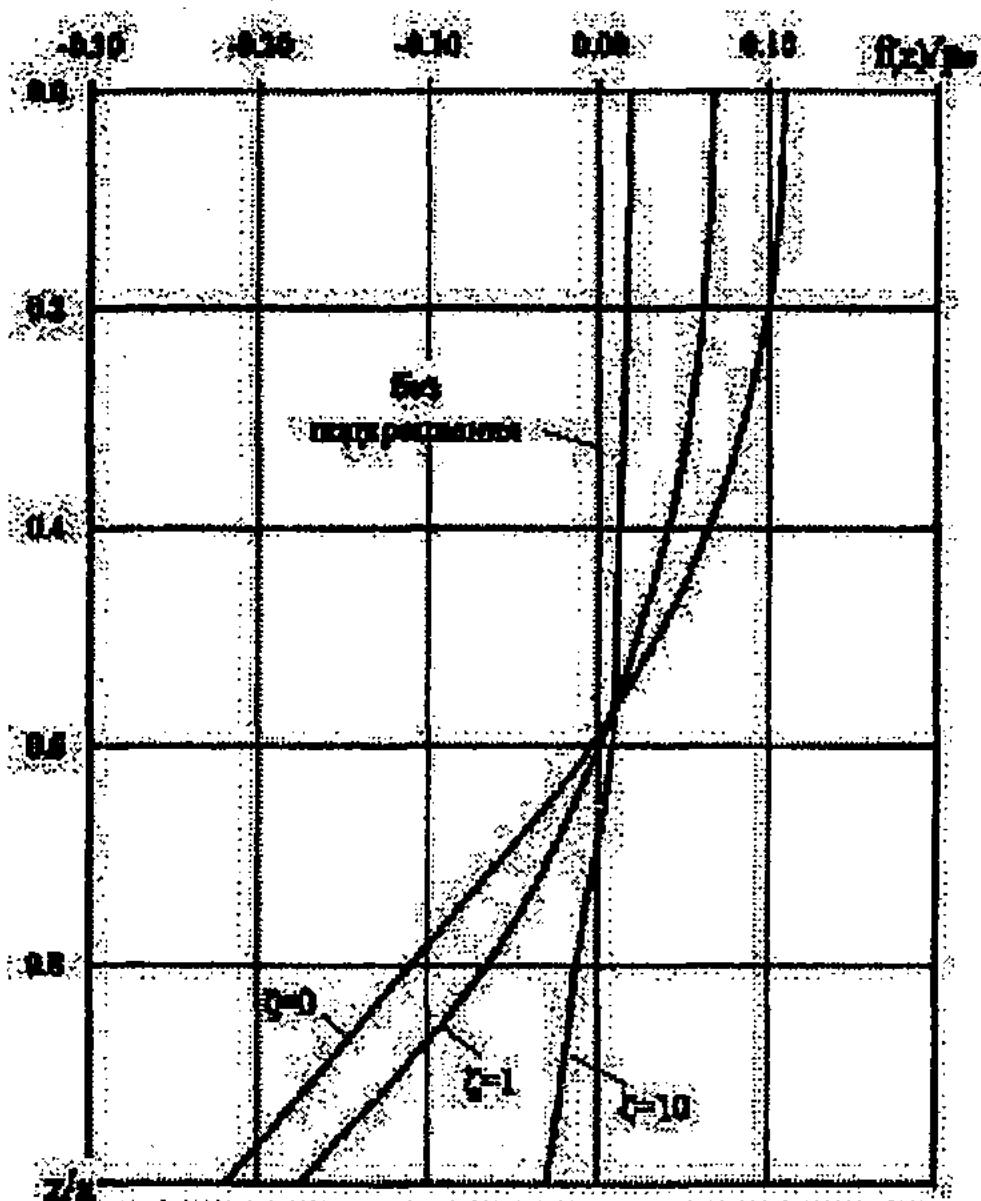


Рисунок 6. Давление на крепь различной жесткости

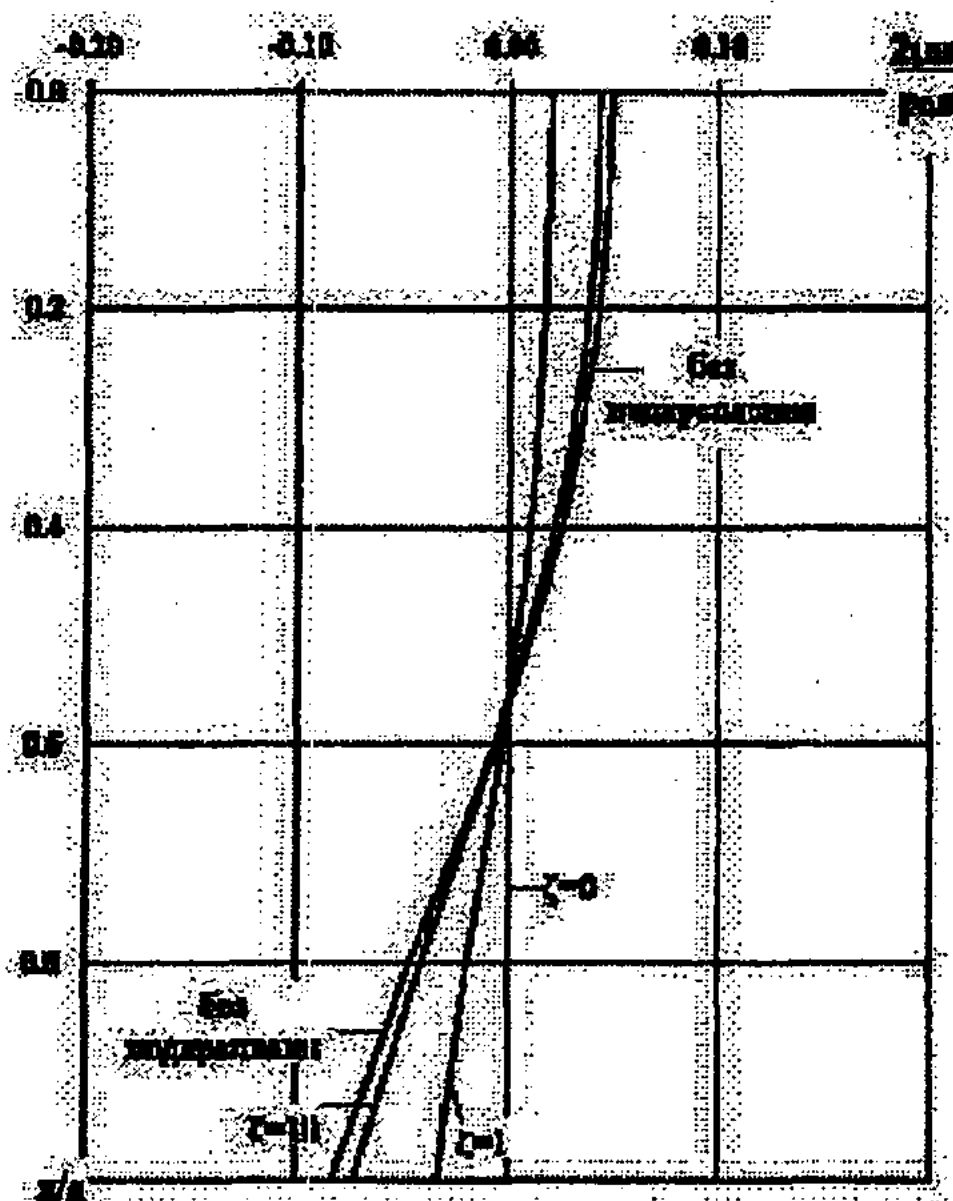


Рисунок 7. Искажение цилиндрической поверхности ослабления вследствие радиальных перемещений, при различной жесткости крепления

Литература

1. Айзенберг Д.Ю., Шапиро Г.С. О передаче давления через слой, имеющий цилиндрическое отверстие. М.: Инж. сб., 1950, №7.



2. Васильев В.З. Агуф Е.И. Первая основная задача для слоя с круговым отверстием.- М.: Известия Академии Наук СССР. Механика Твердого Тела, 1980. - с. 68-77.
3. Васильев В.З. Применение метода неполных решений в случае первой основной задачи для полубесконечного цилиндра. Тр. ЛИСИ, 1973, №73, С. 23.
4. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф. Точное решение задачи о распределении напряжений около кругового отверстия в упругом слое // Прикладная механика. Киев.1968, Т. 4, В. 10, С. 38-45.
5. Невзоров Н.И. Осесимметричная деформация плит с упругим включением: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Л., 1990.
6. Reiss E.L. Extention of an Infinite Plate with a Circular Hole. J. Soc. Industr. and Appl. Math., 1963, vol. 11, No. 4.
7. Sternberg E. Three dimensional stress concentration in the theory of elasticity. Appl. Mech. Revs, 1958, 11, p. 1-4.

**Рашидов Т.Р.** – академик АН РУз (Узбекистан, Ташкент)

**Абдусатторов А.А.** – д.т.н., профессор ТашИИТ (Узбекистан, Ташкент)

**Юлдашев Т.Ю.** – к.т.н., с.н.с., НИИ «Алгоритм-Инженеринг» (Узбекистан, Ташкент)

**Хайдаров А.Х.** - к.т.н., доцент ТашИИТ (Узбекистан, Ташкент)

**Маткаримов А.Х.** – ассистент ТашИИТ (Узбекистан, Ташкент)

### ВЯЗКОУПРУГИЕ ЗАДАЧИ СЕЙСМОДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В монографии /1/ подземное сооружение рассматривается как совокупность взаимодействующих с грунтом балочно-рамных конструкций и жестких массивных тел. Все линейные элементы сооружения деформируются по схеме бруса (растяжение, кручение, пространственный изгиб). Учитывается пространственная неоднородность сейсмической волны.

Как известно, при совместных продольных, поперечных и крутильных колебаниях стержней законы распределения перемещений, деформаций и напряжений в сечениях стержня сложны. Исследования, проведенные Т.Ю.Джанелидзе и А.А.Уманским, привели к построению прикладной теории стержней произвольного сечения. На основе допущения и гипотез, приведенных в /2/, общие перемещения конструкции принимаются в виде:

$$\begin{aligned} u_1 &= u - y\alpha_1 - z\alpha_2 + \varphi v + a_1\beta_1 + a_2\beta_2, \\ u_2 &= v - z\theta, \\ u_3 &= w + y\theta, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы поворота сечения при чистом изгибе,  $\beta_1, \beta_2$  – углы поперечного сдвига,  $\theta$  – угол кручения,  $v$  – погонная закрутка,  $\varphi$  – функция кручения Сен-Венана.

На основе перемещения (1) вычисляется вариации кинетической энергии, с учетом соотношения Коши, закона Гука вычисляется вариации потенциальной энергии, формируется вариации работы внешних сил. При формировании вариации работы внешних сил учитывается трения конструкции с грунтом.

Подставляя выражения вариации кинетической, потенциальной энергий и работы внешних сил на вариационный принцип Гамильтона-Остроградского и выполняя операции интегрирования по частям, формируется вариационное уравнение /2/, откуда получается система дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и



начальными условиями:

$$\begin{aligned} -A \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} + B \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + C \frac{\partial Y}{\partial x} + DY + F &= 0, \\ (-\bar{B} \frac{\partial Y}{\partial x} + \bar{C} Y + P^{\text{sp}}) \delta Y \Big|_x &= 0, \\ A \frac{\partial Y}{\partial t} E \delta Y \Big|_{t=t_0} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$D = D_n + D_A, \quad C = \bar{C}_A - \bar{C}_n.$$

Краевая задача (2) выведена с учетом инерции вращения и поперечного сдвига подземных сооружений при пространственном нагружении. При вязкоупругом взаимодействии сооружений с окружающим грунтом для сил взаимодействия по принципу Вольтерра имеем

$$P^b(x, t) = D_A^* Y = D_A \left[ Y - \int_0^t R(t-\eta) Y(x, \eta) d\eta \right]. \quad (3)$$

Берём слабосингулярное трехпараметрическое ядро /1, 3/

$$R(t) = \bar{A}_b e^{-\beta t} t^{\alpha-1}, \quad 0 < \alpha < 1, \quad [\beta] = \text{сек}^{-1}, \quad [\bar{A}_b] = \text{сек}^{-\alpha}. \quad (4)$$

Трехпараметрическое ядро (4) имеет особенность, для устранения этой особенности произведем в подынтегральном выражении (3) с учетом (4) замену переменных для фиксированных  $t_n = (n-1)\tau$  по /5/, тогда интеграл можно вычислить по какой-либо квадратурной формуле:

$$P^b(x, t_n) = D_A \left[ Y - \frac{A_b}{\alpha} \sum_{k=1}^n B_k^b e^{-\beta t_k} Y(x, t_n - t_k) \right], \quad n = 1, \dots \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta S_k &= t_k^\alpha / (k-1), \quad k = \overline{2, n}; \quad \Delta S_1 = t_1^\alpha, \quad S_k = (k-1) \Delta S_k, \quad k = \overline{1, n}; \\ B_n^b &= \Delta S_n / 2, \quad B_1^b = \Delta S_1 / 2, \quad B_j = \Delta S_j, \quad j = \overline{2, n-1}; \\ t &= \tau \bar{t}, \quad A_b = \bar{A}_b \tau^\alpha, \quad \beta = \tau \bar{\beta}. \end{aligned}$$

С учетом (5) из (2) имеем

$$-A \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} + B \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + C \frac{\partial Y}{\partial x} + D_n Y + D_A \left[ Y - \frac{A_b}{\alpha} \sum_{k=1}^n B_k^b e^{-\beta t_k} Y(x, t_n - t_k) \right] + F = 0, \quad (6)$$

$$\left[ -\bar{B} \frac{\partial Y}{\partial x} + \bar{C} Y + P^{2P} \right] \delta Y \Big|_x = 0, \quad (7)$$

$$A \frac{\partial Y}{\partial t} E \delta Y \Big|_x = 0. \quad (8)$$

Решение задачи (6) – (8) можно получить конечно-разностным методом. При построении вычислительной схемы для системы дифференциальных уравнений (6) с граничными (7) и начальными (8) условиями применяем центральные конечно-разностные соотношения метода конечных разностей с точностью второго порядка с дробными шагами.

На шаг по времени ставится ограничение  $0 < \tau < h^2 / 4$ , это соответствует условию

$\tau = r h_{\min}^2$ ,  $r \leq 1/2$ , поставленной в /6/, другое ограничение  $c_{\max} \tau < \frac{1}{n} h_{\min}^2$ ,  $n \geq 2$ , также удовлетворяет условию устойчивости.

Используя центральные конечно-разностные соотношения /6/, аппроксимируем слагаемые дифференциальных выражений системы (6)



$$Y_{i,j+1} = \tilde{A}Y_{i-1,j} + \tilde{B}Y_{i,j} + \tilde{C}Y_{i+1,j} - \tilde{D}_A \sum_{k=1}^{j+1} B_{k-1}^b e^{-\beta^{k-1}} Y_{i,j+1-k} + \tilde{F}_{i,j} - Y_{i,j-1}, \quad (9)$$

где

$$\tilde{A} = \tau^2 A^{-1} \left( \frac{B}{h^2} - \frac{C}{2h} \right), \quad \tilde{B} = \tau^2 A^{-1} \left( \frac{2A}{\tau^2} - \frac{2B}{h^2} + D_n + D_A \right),$$

$$\tilde{C} = \tau^2 A^{-1} \left( \frac{B}{h^2} + \frac{C}{2h} \right), \quad \tilde{F}_{i,j} = \tau^2 A^{-1} F_{i,j}, \quad \tilde{D}_A = \tau^2 A^{-1} D_A \frac{A_B}{\alpha}.$$

С учетом (9) из (6) – (8) получена задача Коши.

Составлена программа в программной среде «Microsoft Visual Basic 6.0» и рассмотрены некоторые частные случаи задачи, например, когда сейсмическая сила действует в вертикальной плоскости под углом к продольной оси подземного трубопровода.

Для анализа влияния вязкоупругости взаимодействия подземных трубопроводов с окружающим грунтом на НДС подземных трубопроводов рассмотрены примеры.

В [4] приведены результаты экспериментальных работ по изучению вязкоупругих свойств взаимодействия различных труб с различными грунтами. Для описания процессов вязкоупругости использованы различные виды ядра релаксации, в том числе слабосингулярные ядра. Найдены значения параметров слабосингулярного ядра для грунтов из суглинка, песка и гравия; для суглинка  $A=0.134, \alpha=0.2, \beta=0.25$ , для песка  $A=0.0748, \alpha=0.2, \beta=0.048$ , для гравия  $A=0.0815, \alpha=0.2, \beta=0.25$ . Используя результаты экспериментов определено значение коэффициента продольного взаимодействия для чугунной трубы с наружным диаметром  $D_n=0.429$  м, толщиной  $\delta=12.5$  мм, уложенной в суглинках, равное  $k_x=2.28 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>.

Проведен анализ численных результатов по влиянию параметров вязкоупругости взаимодействия стальной, чугунной и железобетонной трубы с грунтами из суглинка, супеси, песка и гравия. Анализ численных результатов показывает существенное влияние вязкоупругого взаимодействия на НДС подземных трубопроводов.

Численные результаты для стальной трубы ( $E=2.1 \cdot 10^8$  кН/м<sup>2</sup>,  $\rho=7.8$  кН·сек<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>,  $R=0.6$  м,  $\gamma=0.585$  м,  $\delta=0.15$  мм,  $L=10$  м), уложенной в песчаном грунте с коэффициентом взаимодействия  $k_x=3.75 \cdot 10^3$  кН/м<sup>3</sup> при слабосингулярном ядре вязкоупругости ( $A=0.01, \beta=0.01$  и  $\alpha=0.5$ ), приведены в виде графиков на рисунках 1-4. На рисунке 1-4 кривые 1 и 2 построены соответственно при упругом и вязкоупругом взаимодействии стальной трубы с грунтом. Отсюда видно, что вязкость взаимодействия приводит к уменьшению значений  $u, w, \alpha, \beta$ .

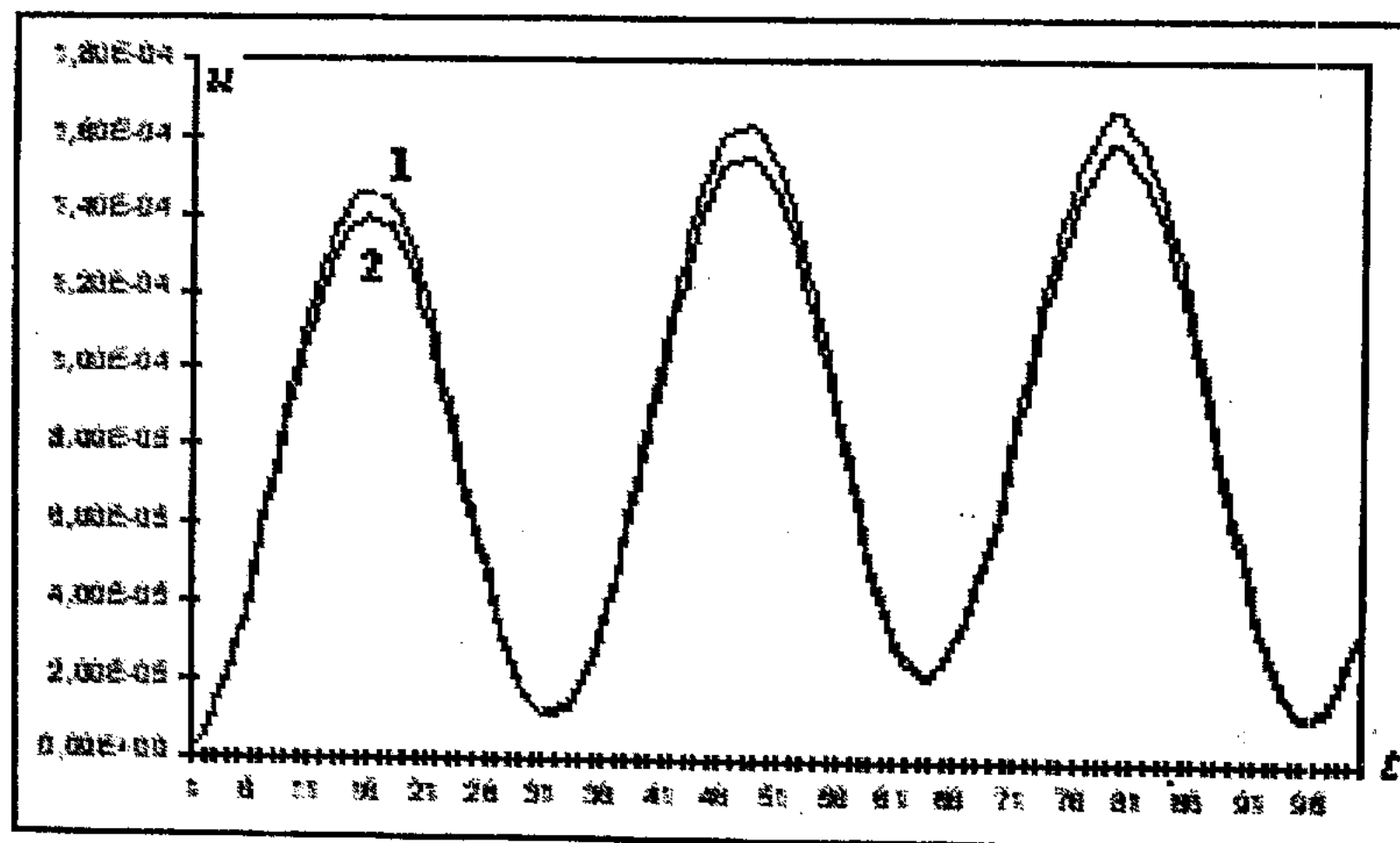


Рисунок 1. Изменение во времени продольного перемещения



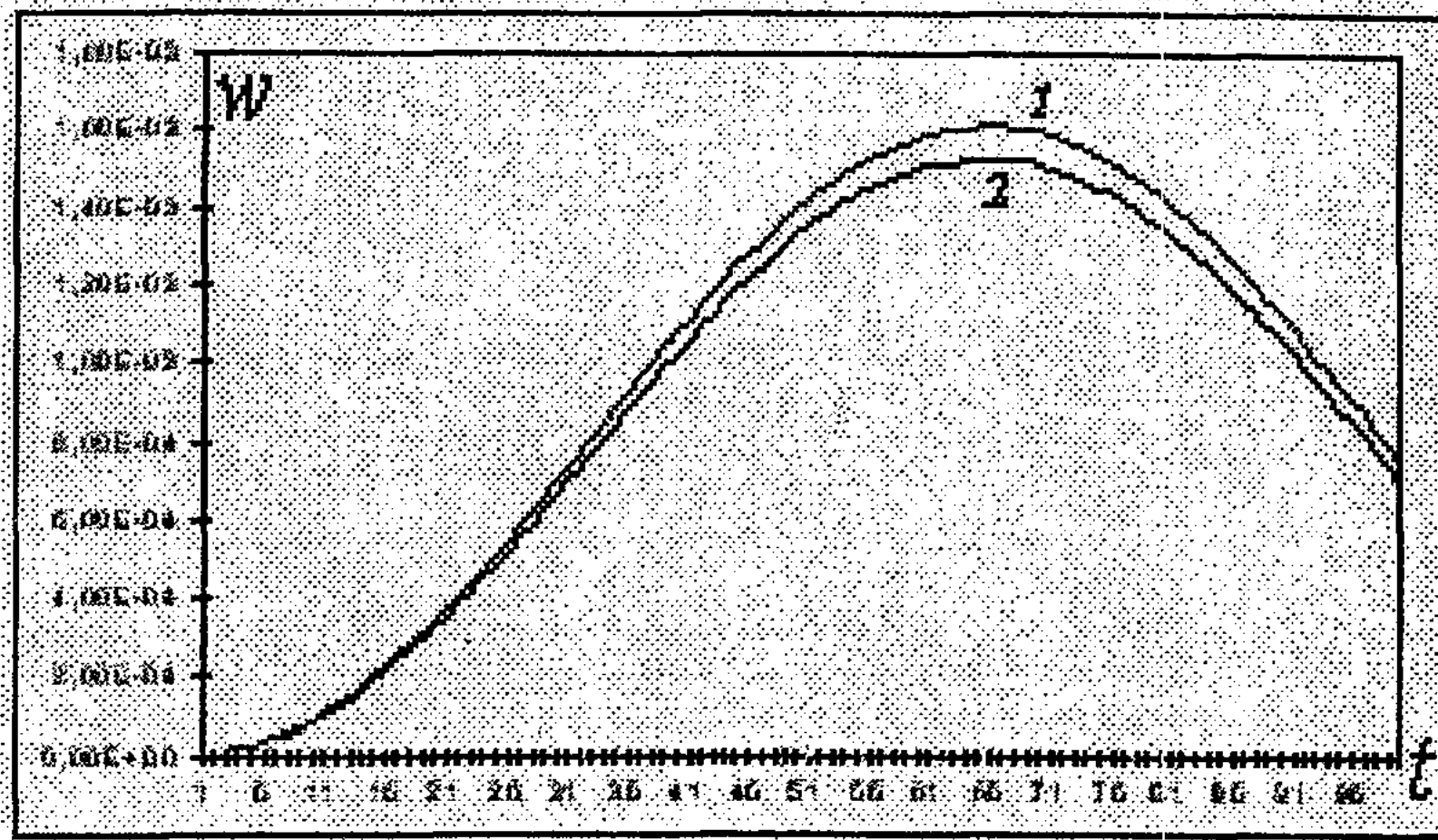


Рисунок 2. Изменение во времени поперечного перемещения (прогиба)

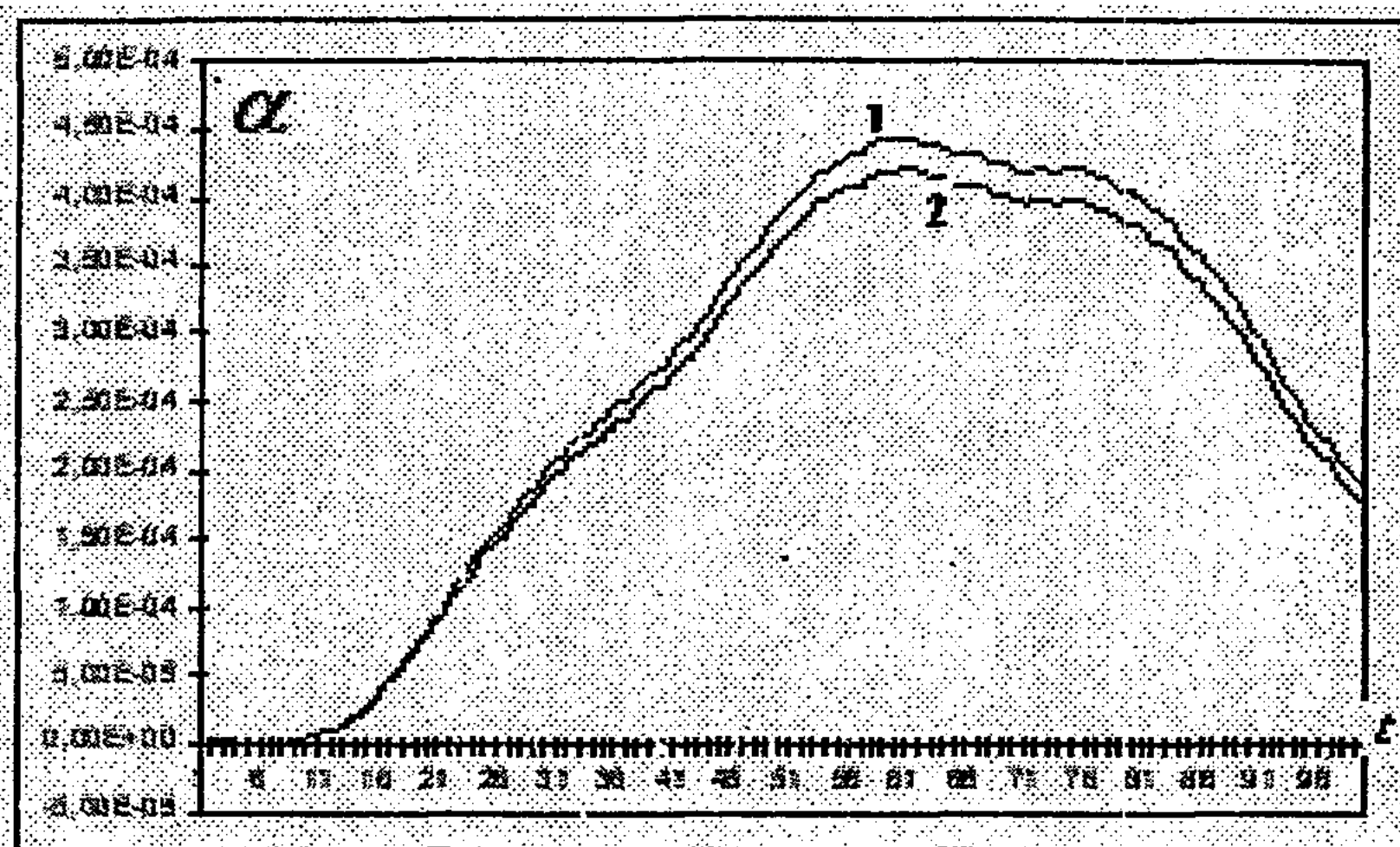


Рисунок 3. Изменение во времени угла наклона  $\alpha$  сечения трубы

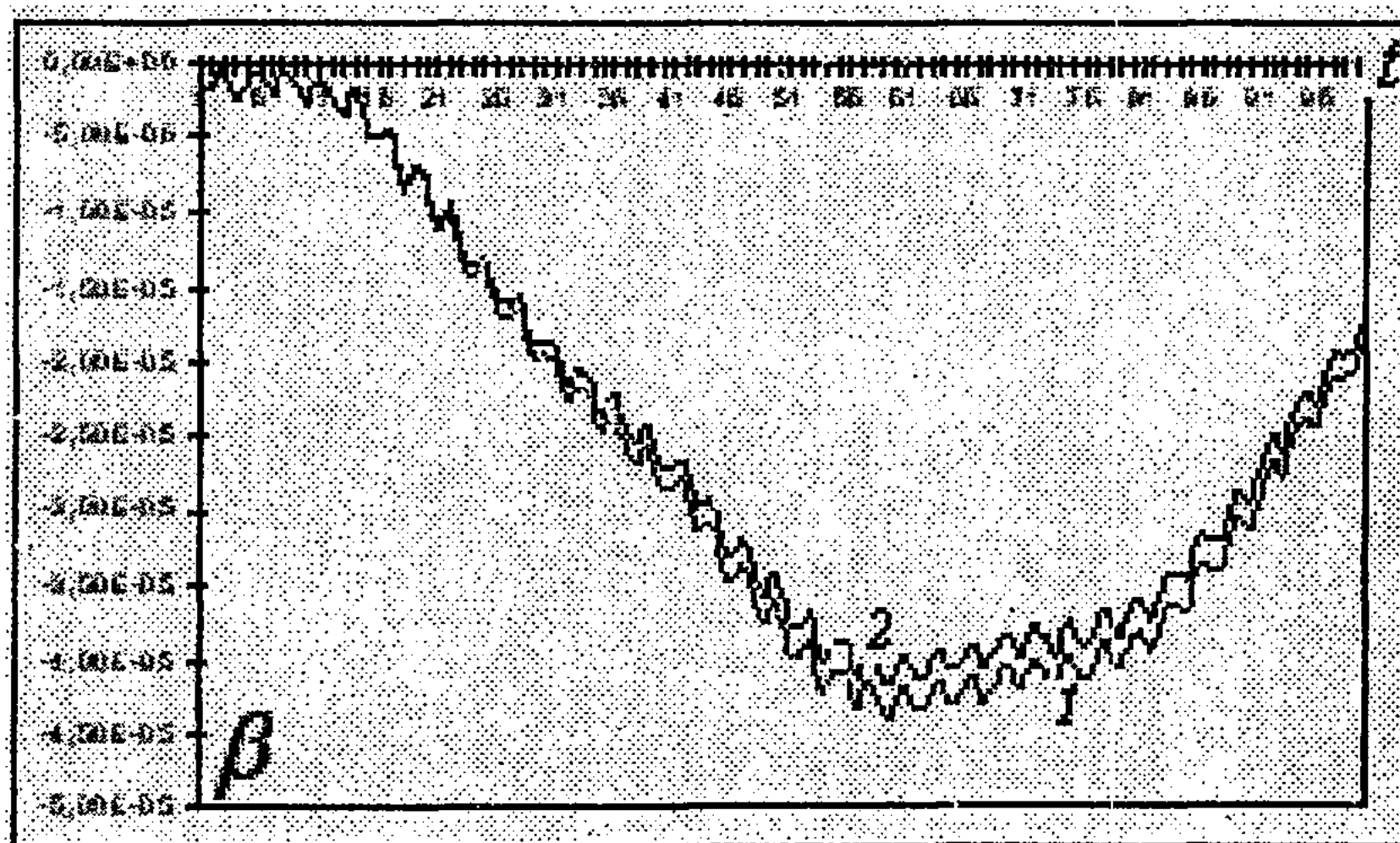


Рисунок 4. Изменение во времени угла поперечного сдвига  $\beta$  сечения трубы

Сейсмическое перемещение грунта принято в виде импульса постоянной величины  $w_0 = \text{const}$ . Для значения максимальной амплитуды сейсмических колебаний принято  $w_0 = 0.007$  м, что соответствует  $k_c = 0.1$  при преобладающем периоде  $T = 0.5$  с. Значение угла наклона действия нагрузки к продольную ось подземного трубопровода на приведенных рисунках равно к  $60^\circ$ .

В таблице 1 приведены значения  $u$ ,  $w$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $N$ ,  $M_y$  при упругом и вязкоупругом взаимодействии стальной трубы с грунтом для различных значений времени, где первая



строка соответствует к упругому случаю, вторая строка соответствует к вязкоупругому случаю, в третьей строке даны разницы значений в процентном отношении к упругому.

Время в таблице безразмерное. Отсюда видно, что влияние вязкости взаимодействия приводит к уменьшению значений  $u$ ,  $w$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $N$ ,  $M_y$  до 12%.

Таблица 1. Значения  $u$ ,  $w$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $N$ ,  $M_y$  при упругом и вязкоупругом взаимодействии для различных значений времени

Время	$U_{\text{вяз/упр}}$	$W_{\text{вяз/упр}}$	$\alpha_{\text{вяз/упр}}$	$\beta_{\text{вяз/упр}}$	$N_{\text{вяз/упр}}$	$M_y(\text{вяз/упр})$
16	1,39437E-04	2,13608E-04	3,40099E-05	-4,66219E-06	2,54728E+02	6,17863E+01
	1,46433E-04	2,24399E-04	3,57451E-05	-4,88679E-06	2,67504E+02	6,48959E+01
	5,21	4,98	4,97	5,01	6,27	4,97
48	1,55004E-04	1,26633E-03	3,44501E-04	-3,36072E-05	2,47818E+02	3,86577E+02
	1,62894E-04	1,33827E-03	3,64053E-04	-3,55243E-05	2,60262E+02	4,08568E+02
	4,84	5,38	5,37	5,40	4,78	5,38
64	2,11246E-05	1,51116E-03	4,10410E-04	-3,89497E-05	5,56661E+00	4,59657E+02
	2,25538E-05	1,60868E-03	4,37101E-04	-4,14862E-05	5,93258E+00	4,89476E+02
	5,06	7,18	7,18	7,07	4,72	7,19
96	1,11186E-05	8,62665E-04	2,17554E-04	-2,15706E-05	-3,44827E+00	2,66906E+02
	1,26659E-05	9,15734E-04	2,27791E-04	-2,40542E-05	-3,394130798	2,86196E+02
	12,22	5,80	4,49	10,32	-1,59	6,74

#### Литература

1. Рашидов Т.Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. –Ташкент: Фан, 1973. - 179 с.
2. Кабулов В.К. Алгоритмизация в теории упругости и деформационной теории пластичности. -Ташкент: Фан, 1966. - 394 с.
3. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – Москва: Высшая школа, 1979. -272 с.
4. Рашидов Т.Р., Хожметов Г.Х. Сейсмостойкость подземных трубопроводов. - Ташкент: Фан, 1985. - 152 с.
5. Бадалов Ф.Б. Методы решения интегральных и интегро-дифференциальных уравнений наследственной теории вязкоупругости. -Ташкент: Мехнат, 1987. -272 с.
6. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы (Введение в теорию). - Москва: Наука, 1977. – 440 с.

Биттибаев С.М. – д.т.н., профессор КазАТК (Казахстан, Алматы)

Султангазинов С.К. - к.т.н., доцент КазАТК (Казахстан, Алматы)

Бихожаева Г.С. – к.т.н., доцент КазАТК (Казахстан, Алматы)

Ахметова Б.У. – соискатель КазАТК (Казахстан, Алматы)

### НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

В мировой практике железных дорог бесстыковой путь стал наиболее прогрессивной и широко распространенной конструкцией верхнего строения пути, который эксплуатируется в различных эксплуатационных и климатических условиях и дает существенный технико-экономический эффект благодаря ряду ее преимуществ, среди которых /1-3/:

- повышение плавности и комфортабельности движения поездов по сравнению со звеньевым путем;



- улучшение показателей динамического воздействия пути и подвижного состава;
- увеличение межремонтных сроков этих технических средств;
- уменьшение расходов на тягу поездов вследствие снижения основного сопротивления их движения;
- повышение надежности работы тяговых и сигнальных электрических цепей;
- уменьшение расхода металла для стыковых скреплений;
- улучшение экологической ситуации за счет снижения шума от проходящих поездов;
- применение железобетонных шпал при сокращении потребления ценной деловой древесины и пропитки деревянных шпал вредными для здоровья антисептиками.

Эффективность и расширение сфер применения бесстыкового пути увеличивается в результате освоения перекладки рельсовых путей на участках их эксплуатации и повторного использования старогодных шплетей на менее деятельных путях.

Бесстыковый путь является типовой конструкцией верхнего строения пути в странах СНГ и за рубежом. Первый участок бесстыкового пути, на бывшей Казахской железной дороге, был уложен в 1962 г. и к 1995 г. протяженность бесстыкового пути достигла на Алматинской и Западно-Казахстанской железных дорогах 20%, а на Целинной железной дороге – 28% длины главных путей. Рост протяженности бесстыковых путей за 1962-1996 годы приведен на рисунке 1 /4/.

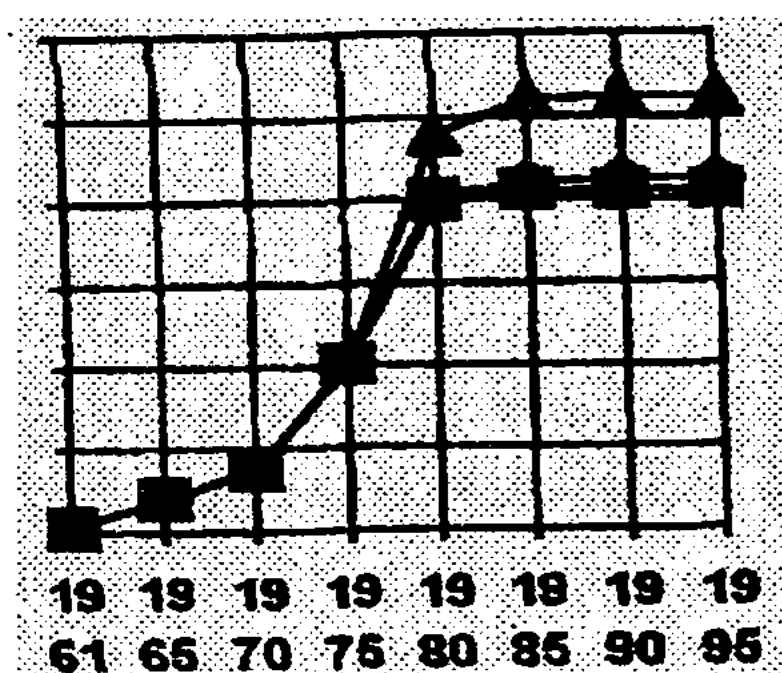


Рисунок 1. Рост протяженности бесстыкового пути на железных дорогах Казахстана

В верхнем строении бесстыкового пути, в основном, применяются рельсы типа Р65 и только на участке в 20км – рельсы типа Р50. Длина шплетей колеблется от 310 до 800 м. На протяжении всего участка пути рельсы уложены на железобетонных шпалах типа С-56-2 со средней эпюрой шпал 1870 шт. на 1 км пути с применением скрепления типа КБ.

Как известно, рельсы работают в чрезвычайно сложных условиях. При этом являясь несущей конструкцией, рельс воспринимает воздействие многих сил /5, 6/:

- нагрузки подвижного состава, которые являются переменными;
- продольные силы, связанные торможением, угоном, температурными воздействиями;
- боковые силы, связанные с толчками подвижного состава;
- силы инерции неподрессоренных масс;
- дополнительные динамические силы, связанные с местными неровностями на поверхностях катания колес и рельсов.

Анализ причин одиночной замены рельсов, показывает, что значительную часть при этом составляют дефекты, возникновение которых объясняется недостаточной контактной прочностью и усталостной долговечностью рельсов. Такие дефекты, как отслоение и выкрашивание металла на поверхности катания головки рельса (дефект 10.1-2), выкрашивание металла на боковой рабочей выкружке головки (дефект 11.1-2) составляют в рельсах типа Р65 до 35%.



С 1987г. комитет D173 Международного союза железных дорог (МСЖД) ведет исследования по выявлению причин и механизма развития контактно-усталостных повреждений рельсов. Эту работу совместно проводят 11 европейских железных дорог, шесть металлургических заводов и пять университетов. Вначале провели обобщение эксплуатационного материала по выходу рельсов по дефектам контактно-усталостного происхождения, проанализировали качество и структуру рельсовой стали, провели лабораторные и модельные испытания. На основании этого были сформулированы следующие направления:

- более глубокое изучение причин возникновения дефектов контактно-усталостного происхождения;
- дальнейшее изучение эффективности шлифовки рельсов для удаления зарождающихся трещин на поверхности катания и снижения контактных напряжений;
- описание с помощью математических моделей механизма образования контактно-усталостных дефектов с учетом характеристик рельсовой стали;
- проведение сопоставительных испытаний в эксплуатационных условиях новых термоупрочненных рельсов и стандартных рельсов МСЖД из стали 900А /7/.

Экспериментально-теоретические исследования контактно-усталостной прочности рельсов ведутся в ВНИИЖТе, ЦНИИ МПС РФ, ПГУ ПС, МГУ ПС, СГУ ПС, КазАТК, КУПС и др.

Одним из основных показателей надежности пути является количество одиночных отказов рельсов в год на 100 км развернутой длины главного пути.

Как известно доля отказов рельсов по контактно-усталостным повреждениям становятся преобладающей на железных дорогах АО НК «Қазақстан темір жолы», также как и на железных дорогах России и составляет более 70% от общего количества отказов. Эти отказы часто приводят к изломам рельсов под поездами.

Рельсы, являющиеся основными элементами железнодорожного пути, непосредственно воспринимающими динамическую нагрузку колес подвижного состава, подвергаются усталостному нагружению в условиях многоосного напряженно-деформированного состояния, связанного как с вертикальными осевыми нагрузками, так и поперечными и продольными силами, вызывающими совместное действие изгиба с кручением и продольного растяжения и (или) сжатия. При этом в местах контакта колеса и рельса возникают значительные контактные напряжения, изменяющиеся при прохождении каждого колеса по рельсу, приводящие как к зарождению дефектов типа трещин поперечного сдвига (тип II) и продольного сдвига (тип III), так и усталостному изнашиванию поверхности катания рельсов.

Опыт эксплуатации и многочисленные исследования рельсов после различной наработки тоннажа в разнообразных условиях свидетельствует о том, что большую часть своего срока службы они эксплуатируются при наличии износа головки рельсов. Как показали исследования по определению влияния изменяющихся во времени эксплуатационных нагрузок на возникновение износа поверхности катания рельсов, для прогнозирования срока службы рельсов необходима разработка общего метода, основанного на критериях механики усталости и износа.

Поэтому вопросы оценки усталостного повреждения рельсов под действием колесных нагрузок играют важную роль при выборе оптимального режима содержания пути в условиях эксплуатационного нагружения.

На железных дорогах Казахстана, так же как и в России, эксплуатируется температурно-напряженная конструкция бесстыкового пути. Основное отличие работы бесстыкового пути от обычного звеньевоего состоит в том, что в рельсовых плетях действуют значительные продольные усилия, вызванные изменением температуры.

При повышении температуры рельсовых плетей, по сравнению с температурой закрепления, в них возникают продольные силы сжатия, которые могут создать



опасность выброса пути (рис. 2). При понижении температуры появляются растягивающие силы, которые могут вызвать излом плети рельсового стыка из-за среза болтов. Дополнительное воздействие на бесстыковой путь оказывает силы, создаваемые при выправке, рихтовке, очистке щебня и других ремонтных путевых работах.

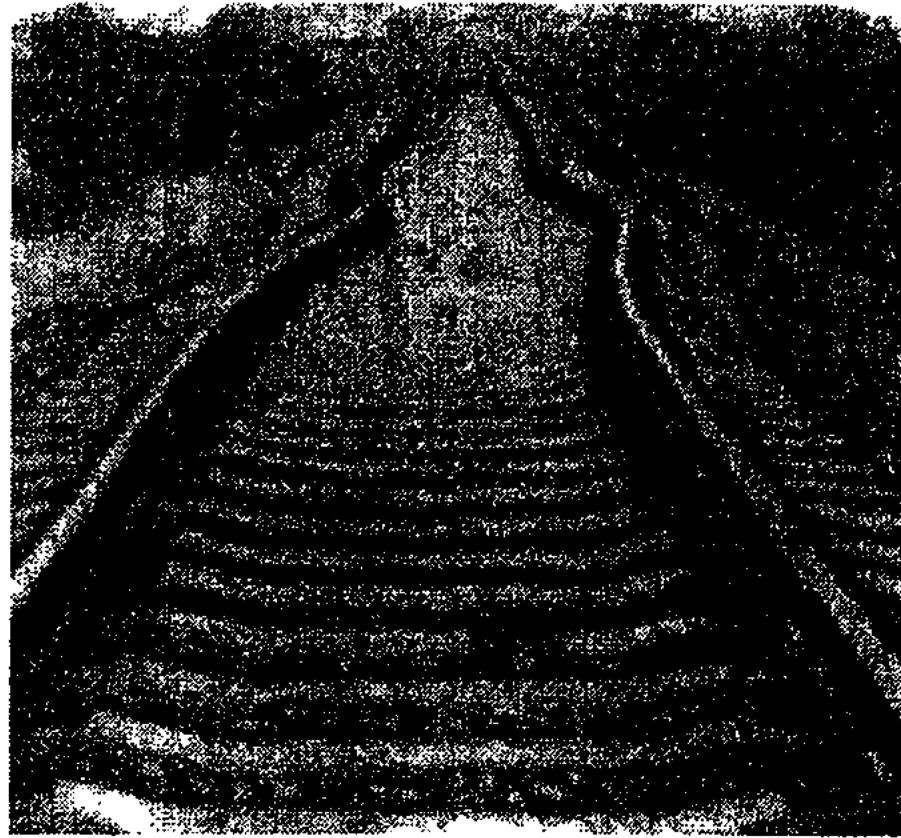


Рисунок 2. Опасность выброса пути

Сравнительно большая протяженность Казахстанских железных дорог требует увеличения скоростей движения поездов и повышения надежности элементов верхнего строения пути, связанных с динамическими свойствами рельсовых скреплений /8/. За рубежом большое внимание уделяется разработке новых прогрессивных, ресурсосберегающих и малообслуживаемых конструкций верхнего строения пути и совершенствованию существующих, повышению их надежности и долговечности. Проводимые у нас в этом направлении исследования связаны с компьютеризацией и внедрением в практику современных расчетных методов проектирования верхнего строения пути.

Одной из важнейших проблем исследований в области верхнего строения пути является динамика передачи нагрузки от рельса на подрельсовые основания, которые выполняют рельсовые скрепления. Поэтому, совершенствование элементов современных рельсовых скреплений для железнодорожных шпал, которые являются балками переменного сечения, остаются важными задачами железнодорожного пути /9/. Как известно, развитие компьютерной техники привело к широкому использованию методов строительной механики для расчетов различных сложных конструкций, типа верхнего строения пути. В теории получили широкое распространение численные методы расчета (метод конечных элементов, метод граничных интегральных уравнений), ориентированные на использование современных ПЭВМ, что способствовало более точному моделированию, оценке влияния различных факторов на прочность и надежность пути, оптимизации параметров путевого хозяйства, путем исследования напряженно-деформированного состояния пути.

#### Литература

1. Мищенко К.М. Расчет бесстыкового пути. Сб. трудов МИИТ, вып. 58, 1950.
2. Боченков М.С. Продольные силы и деформации в бесстыковом пути с автоматической разрядкой температурных напряжений // Вестник ВНИИЖТ, 1954. - №7, С. 12-26.
3. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (с применениями и дополнениями, утвержденными указанием МПС России 22.12.2000, №С-3112У). М., Транспорт, 2001. - 36 с.
4. Мусаев С.К. Совершенствование системы ведения путевого хозяйства и новые конструкции пути – Алматы, 1997. - 200 с.



5. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути. Под. ред. С.В. Амелина и Т.Г. Яковлевой – М.: Транспорт, 1990. – 367с.
6. Биттибаев С.М. О динамических воздействиях подвижного состава на рельс. – Сб. научн. тр. «Прочность материалов и конструкций на транспорте», т. III – Алматы, 1966, С. 40–52.
7. Яковлев В.Ф., Семенов Н.И., Абросимов В.И. К оценке сил взаимодействия пути и подвижного состава посредством эксплуатационных измерений траекторий перекачивания колес по неровностям пути. - Труды ЛИИЖТ, вып. 260, 1967, С.59–86.
8. Ваттманн И. Бесстыковый путь. Продольные силы в рельсовом пути / Пер. с нем. Под ред. Е.М. Бромберга. М., Госуд. Тр. железнодорож. изд., 1959. - 183 с.
9. Мищейко К.Н. Бесстыковый рельсовый путь. М., Трансжелдориздат, 1950. - 88 с.

**Биттибаев С.М.** – д.т.н., профессор КазАТК (Казахстан, Алматы)

**Толстунова Т.С.** – аспирант КазАТК (Казахстан, Алматы)

**Искакова Т.К.** - аспирант КазАТК (Казахстан, Алматы)

**Кулжанов С.** – к.т.н., профессор Казахстанского университета «Алатау» (Казахстан, Алматы)

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ И.В. КРАГЕЛЬСКОГО ДЛЯ РАСЧЕТА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В железнодорожной практике систематически обсуждаются проблемы повышенного износа колес подвижного состава и рельсов, приводящих к существенному сокращению срока их службы. Различные оценки этого явления по параметрам технологического характера не позволяют выяснить физическую сущность и причины контактного износа гребня колеса и боковой грани рельса. Между тем повышенный износ влечет за собой большие затраты на их устранение, создают угрозу безопасности движения /1, 2/.

Так, только по данным трех дорог РФ удельный выход рельсов с боковым износом более 15мм составили: в 1998г. - 129шт/млн.т., в 1989г. - 45,3; в 1990г. - 53,6; в 1991г. - 124; в 1992г. - 96; в 1993г. - 58; в 1994г. - 74; в 1995г.-195; в 1996г. - 144; в 1997г. - 170шт/млн.т. /3, 4/.

Как данные показывают исследования /5, 6/ существенное влияние на интенсивность бокового износа рельсов в мм/млн. т брутто имеют как рост динамической нагрузки груженого вагона так и рост поперечной центробежной силы в кривых. Таким образом, установлено, что основным фактором, приводящим к ускоренному росту интенсивности бокового износа рельсов является темпы роста динамической нагрузки подвижного состава.

Для анализа причин фрикционного износа рельсов железнодорожного пути обычно используют критерии в виде фактора износа, определяемой зависимостью /3/

$$\Phi_{из} = N \alpha f , \quad (1)$$

где:  $\sigma_{сп}$  -горизонтальная поперечная нагрузка от гребня колеса на рельс (направляющая сила)  $\alpha$  -угол набегания колеса;  $f$  -коэффициент трения.

По данным В.С. Лысюка /3/ предлагается для оценки фрикционного бокового износа рельсов использовать зависимости вида:

$$\Phi_{из} = \sigma_{сп} l_{сп} k_1 k_2 \dots k_n , \quad (2)$$

где:  $\sigma_{сп}$  - контактное давление гребня колеса на боковую грань головки рельса;

$l_{сп.}$  – путь скольжения гребня колеса по боковой грани головки рельса;  
 $k_1, k_2, \dots, k_n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие износостойкость материала рельсов и колес, смазку, твердость поверхностного катания головки рельсов и т.п.

При этом предполагается, что образование существенного избытка возвышения наружного рельса в кривых приводит к перераспределению напряжений контактного давления за счет продольного скольжения колес, приводящий к так называемому эффекту «точила».

Следовательно, по данным В.С. Лысюка для уменьшения бокового износа рельсов и гребней колес обязательно должно соблюдаться условие, не превышения возвышения по сравнению с пороговым ( $h \leq h_n$ ), а фактические скорости соответственно не должны больше пороговых ( $v \leq v_n$ ). Графики изменения интенсивности бокового износа рельсов и гребней колес в зависимости от возвышения наружного рельса и скорости движения.

Поэтому авторы [4] считают, что избыток возвышения это большая проблема современного состояния железнодорожного пути в кривых, которую необходимо решить в ближайшие годы для снижения интенсивности бокового износа рельсов и гребней колес.

Однако как показывает, теоретические экспериментальные исследования фрикционного износа рельсов колес с учетом скольжения контактирующих поверхностей являются, нелинейными зависимостями, которые аппроксимировать приведенными зависимостями (1) и (2) весьма сложно, так как определение безразмерных коэффициентов  $k_1, k_2, \dots, k_n$  являются, по существу, практически неразрешимой задачей. С другой стороны эти коэффициенты могут характеризовать только изменение износостойкости материала рельсов в заданных (испытываемых) конкретных условиях. Поэтому для определения практического изменения изнашиваемой поверхности рельсов наиболее целесообразно использование модернизированных соотношений И.В.Крагельского, учитывающего влияние усталостных характеристик на боковой износ головки рельсов [6, 7].

Поэтому для уменьшения бокового износа рельсов (остряков), их контактно-усталостных повреждений и резкого снижения отказов пути, т.е. повышения его надежности, рекомендуется реализовать на дорогах научно обоснованные и испытанные экспериментально эффективные технические решения. Реализация их позволит предотвратить возможный рост количества отказов рельсов по контактно-усталостным повреждениям (дефекты 21 и 11) после того, как будет снижена интенсивность их бокового износа.

Основные концепции расчета на износ, связанные с механикой трущихся поверхностей металлов, базируются на следующих критериях:

- а) удельной работе изнашивания, определяемого как отношение мощности трения  $N_T$  к интенсивности изнашивания  $I_h$ ;
- б) критической плотности энергии деформации, применительно к поверхностному разрушению материалов при изнашивании в жидких средах;
- в) критической плотности внутренней энергии, устанавливающей независимость внутренней энергии и ее связь с энергией, расходуемой на нагрев металла и его плавление;
- г) на оценке значения поверхностной энергии как работы, затрачиваемой на образование новой поверхности;
- д) энтропийно энергетическом критерии, являющейся дальнейшим развитием структурно-энергетического подхода, поскольку энтропия является прямой количественной мерой структурной разупорядочности.



Основное уравнение для расчета износа при множественном контакте по методу И.В.Крагельского имеет вид /8/

$$I = k_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{R}} \frac{P_a}{P_r} \frac{1}{n}, \quad (3)$$

где:  $k_1$  - множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхности; обычно  $\alpha$  - коэффициент перекрытия;  $P_a$  - давление на площади  $A$  (номинальной);  $P_r$  - давление на площади  $A$  (фактического контакта);  $h$  - глубина внедрения;  $R$  - радиус единичный микро-неровности;  $n$  - число циклов, приводящих к разрушению деформируемого объема.

В формуле (1) основные составляющие представляют:

1) Первый член  $\sqrt{\frac{h}{R}}$  - выражает относительную глубину внедрения неровностей поверхностей, значение которой определяет вид контактирования. При упругом контакте для рельсовых металлов это значение составляет менее  $10^{-2}$

2) Второй член  $-\frac{P_a}{P_r}$  определяет отношение площади фактического касания к номинальной, так как  $p_a A_a = p_r A_r$ .

3) Третий член уравнения  $\frac{1}{n}$  определяет скорость материала к разрушению при повторном воздействии, то есть определяет сопротивляемость усталости. Оно изменяется в пределах  $-10^{-2}-10^{-10}$ .

Вычисление безразмерных значений уравнения (1) осуществляется для случая взаимодействия абсолютно жесткой шероховатой, не имеющей волнистости поверхности с упругодеформированным телом.

Первое безразмерное отношение

$$\sqrt{\frac{h}{R}} = \left(2 \frac{p_c}{p_r}\right)^{\frac{1}{2\nu}} \Delta^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где:  $p_c$  - давление на контурную площадь;  $\Delta = \frac{R_{\max}}{R b^{\frac{1}{\nu}}}$  - комплексная характеристика

шероховатости;  $R = \frac{R_n R_{np}}{R_n + R_{np}}$  - приведенный радиус неровностей;  $R_n$  - радиус

неровностей в поперечном сечении;  $R_{np}$  - радиус неровности в продольном сечении.

Второе отношение  $\frac{P_a}{P_r}$  определяется следующим образом:

$$p_r = 0,5 E^{\frac{2\nu}{2\nu+1}} \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} p_c^{\frac{1}{2\nu+1}}, \quad (5)$$

$$p_c = 0,2 E^{0,8} \left(\frac{HB}{R_B}\right)^{0,4} p_a^{0,2}, \quad (6)$$

где  $E$  - модуль упругости;  $R_B$  - радиус волны;  $HB$  - твердость по Бринеллю.

Третий множитель  $1/n$  вычисляется с учетом того, что число циклов до разрушения убывает по мере увеличения действующих амплитудных значений напряжения.

Кривую усталости для упругого контакта описывают эмпирически формулами степенного вида.

$$N = \left( \frac{\sigma_b}{\sigma_{np}} \right)^n, \quad (7)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности при растяжении;  $\sigma_{np}$  – действующее напряжение;  $n$  – параметр кривой фрикционной усталости.

Интенсивность усталостного изнашивания по методу И.В.Крагельского может изменяться в пределах от  $10^3$  до  $10^{12}$ . На основании анализа данных по износостойкости различных пар трения составлены классы износостойкости, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Классы износостойкости

Параметры износа	Классы износостойкости									
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
$\lg I_{\min}$	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
$\lg I_{\max}$	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3

При этом, как показывают исследования, имеет место снижение контактно-усталостных повреждений рельсов, несмотря на увеличение осевых нагрузок /9, 10/. Главным методом предупреждения бокового износа рельсов является их смазка с помощью передвижных и стационарных устройств, которые позволяют снизить интенсивность бокового износа рельсов в среднем в 2-2,5 раза.

При этом, как показывает практика лубрикаций рельсов наибольший эффект достигается на участках, где для смазки используются специально оборудованные вагоны, дрезины и электровозы. На этих участках средняя интенсивность бокового износа около 0,1 мм/млн. т, что обеспечивает нормативный срок службы рельсов.

Рельсы быстрее изнашиваются с интенсивностью до 0,5–0,6мм/млн.т на участках действия длительных ограничений скорости при избытке возвышения, когда непогашенные ускорения достигают  $0,5 \div 0,6 \text{ м/с}^2$ . Как показывает практика наименьший боковой износ достигается при величине непогашенных ускорений, не превышающих  $0,1 \text{ м/с}^2$ .

Исследования показали, что износостойкость рельсов определяется большим количеством факторов: сочетанием свойств трущихся материалов; качеством контактирующих поверхностей (чистота поверхности, смазка); характером движения (скольжение, качение, удары, течение); скоростью взаимного перемещения; уровнем нагрузки; отводом отделяющихся частиц (продуктов износа) или присутствием частиц какого-то другого материала, осложняющего трение. В некоторых случаях на процесс износа накладываются коррозионные явления.

#### Литература

1. Лысюк В.С., Каменский В.Б., Башкатов Л.В. Надежность железнодорожного пути / Под ред. В.С. Лысюка – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.
2. Биттибаев С.М., Найманова Г.Т. Усталостное изнашивание рельсов в кривой // Сб. науч. тр. Междун. конф. «Роль транспорта в освоении целинных и залежных земель», посв. 50-летию освоения Целины - Алматы, КУПС, вып. 1, 2004. - С. 133-135.
3. Лысюк В.С. Причины и механизмы схода колеса с рельсов: Проблема износа колес и рельсов. – М.: Транспорт, 1997. – 188 с.
4. Хрущев М.М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин – В сб. Трение и износ в машинах, № 8 – М.: Изд. АН СССР, 1953, с. 5-17.
5. Харач Г.М. Элементы расчета деталей машин на изнашивания – В сб. износостойкость – М.: Наука, 1975. - С. 91-95.