

**ОАО “НИЦ “СТРОИТЕЛЬСТВО”**  
**”НАУЧНО–ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ, ПРОЕКТНО–ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЙ И**  
**КОНСТРУКТОРСКО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ОСНОВАНИЙ И**  
**ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА**  
**НИИОСП ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА**

**К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ**  
**САМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ (II РОДА)**  
**ОСАДОЧНОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ОЦЕНКЕ**  
**ОСТАТОЧНЫХ ЭФФЕКТОВ**

**Мороз Алексей Иосифович**

Москва 2012

Рис.1. Схема изображения процесса образования осадочной обломочной породы в условиях открытой схемы: а - сжатие зерен (1...11 и т.д.) скелета внешней нагрузкой, б – последующее твердение цементного раствора в порах сжатого скелета (показано темным цветом) породы

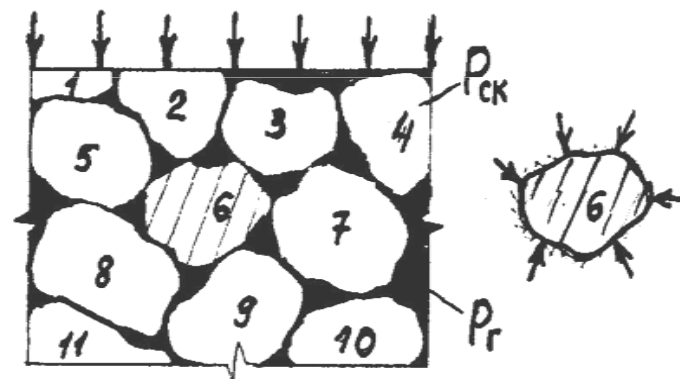
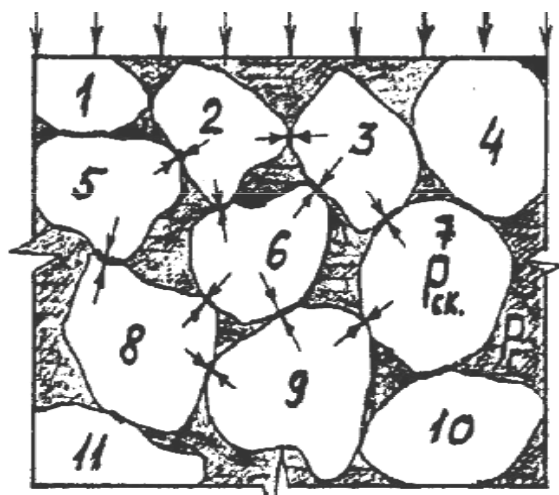
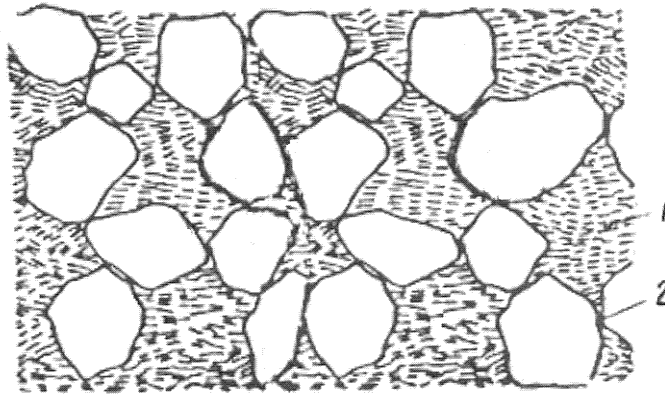


Рис.2. Схема плавунной структуры глины по К. Терцаги



$$\sigma = \sigma_{\text{э}} + \sigma_H \quad (1)$$

Рис.3. Механическая модель, поясняющая две совмещенные системы напряжений в грунтовой массе (Н.М. Герсегованов)

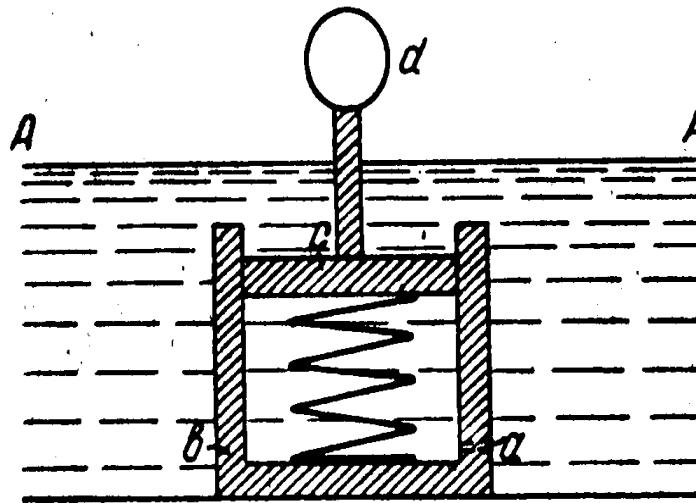
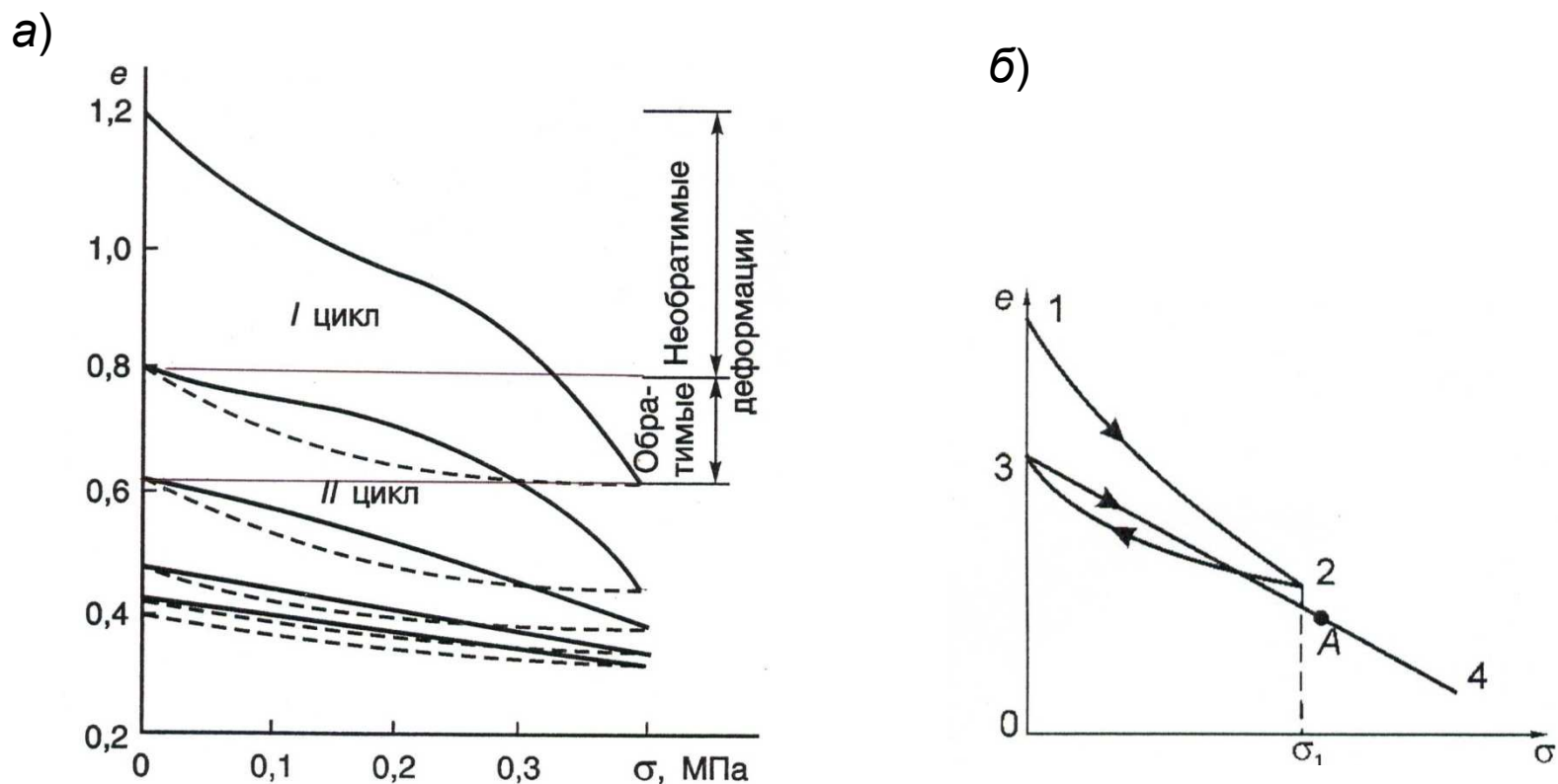


Рис. 4. Компрессионные зависимости несцементированной породы: а - В.Т. Трофимов, Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др.; б - Г.Г. Болдырев



Графики имеют важную особенность, состоящую в том, что независимо от цикла нагружения порода, в том числе и песок, сохраняет упругую деформацию

Рис. 5. Структурная модель из двух упругих элементов, иллюстрирующая образование остаточных напряжений в элементах среды после снятия внешних сил: а) – сжатие элемента  $\Pi_1$  внешней силой  $P$  и скрепление его с несжатым элементом  $\Pi_2$ , б) – снятие силы  $P$ , в и г) – остаточные механические напряжения в элементах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$

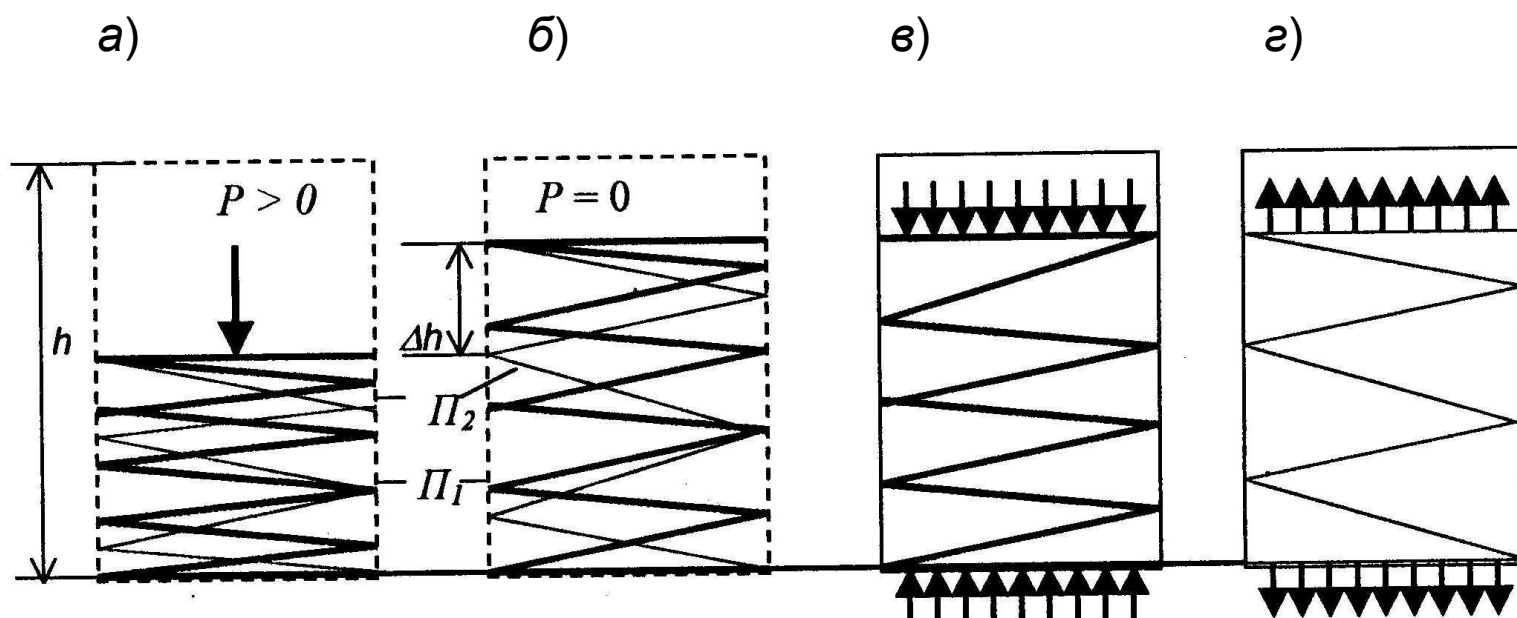
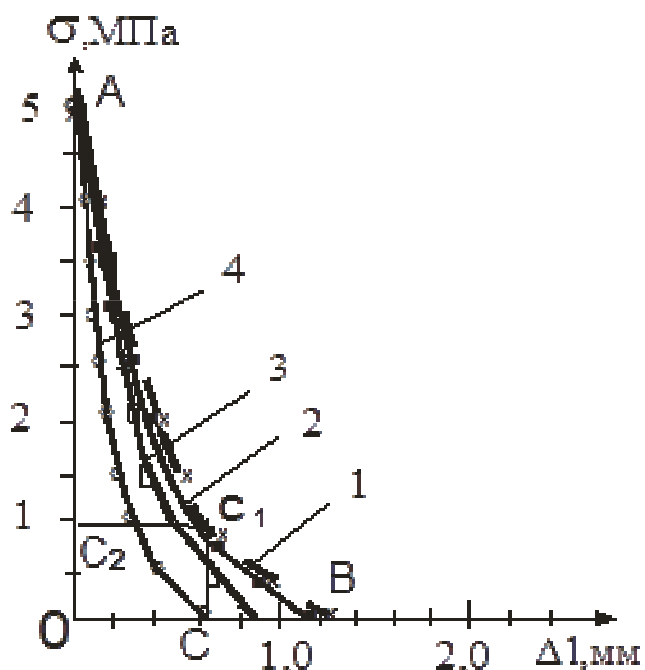
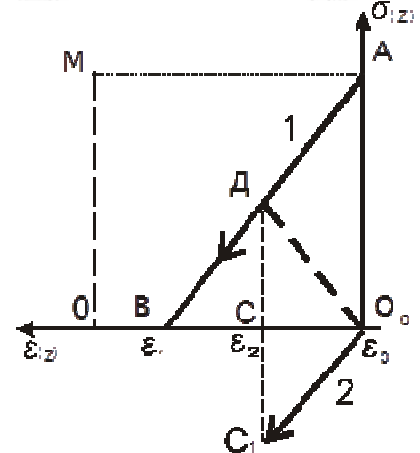
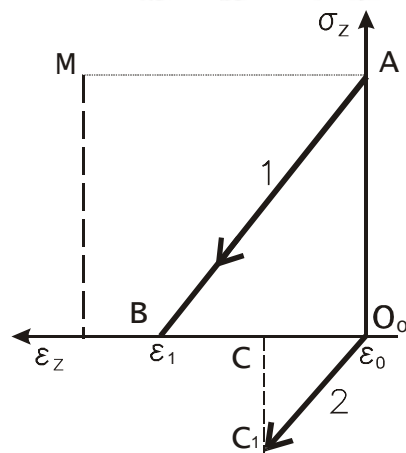
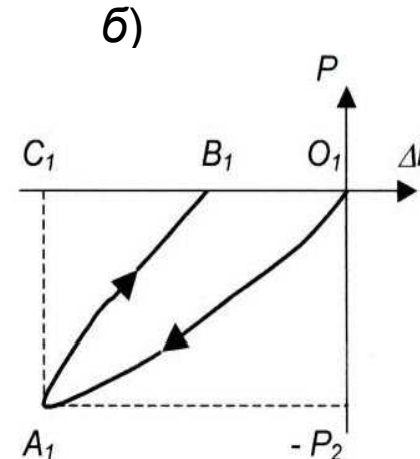
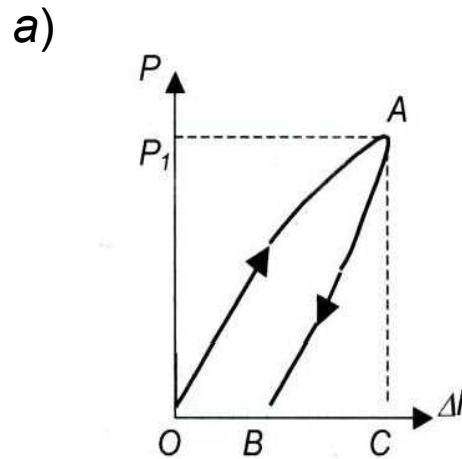


Рис.6. Экспериментальные зависимости  $\sigma=f(\Delta l)$  при разгрузке песка (скелета породы) (1) и цементированных после сжатия скелета образцов: с незатвердевшим раствором (2), с прочностью В10 (3), с прочностью В30 (4)



После разгрузки величина упругих деформаций цементированного сжатого скелета уменьшается в два раза. Величина остаточных напряжений составляет примерно 20% от давления сжатия (5МПа) скелета

Рис.7. Графическая интерпретация формирования самонапряженного состояния. Зависимости между усилиями и деформациями при нагружении и разгрузке для элементов породы: а) – первого (скелета), б) – второго; г) – совмещение зависимостей «напряжение – деформация» для элементов породы в общем начале координат  $O_o$ , е) – точка равенства напряжений  $D$

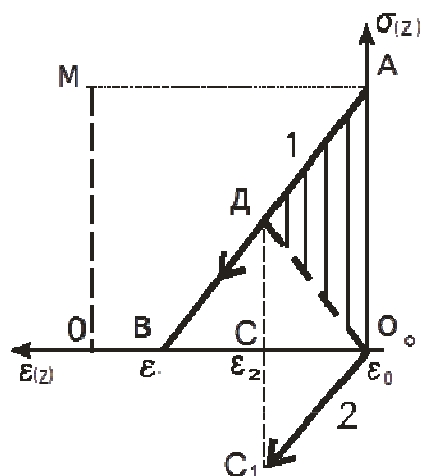


в)

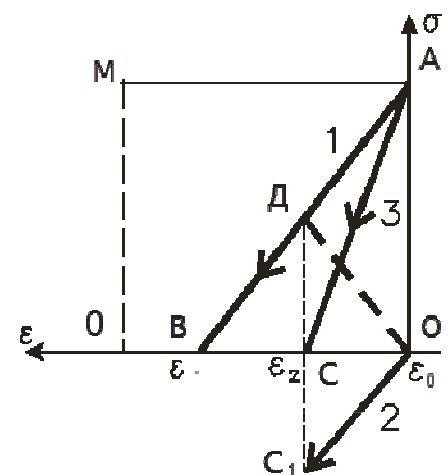
г)

Рис.8. Получение результирующей зависимости 3 при разгрузке (а, б), остаточных напряжений: нормальных (в) и боковых (г)

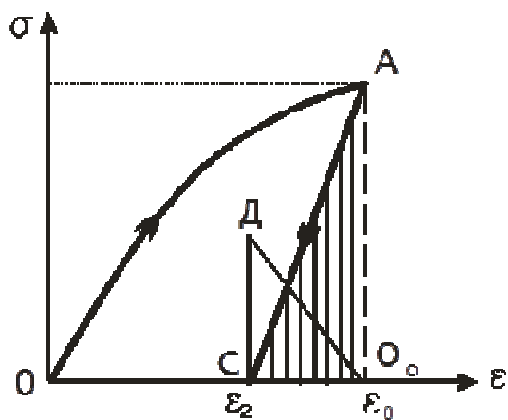
а)



б)



в)



г)

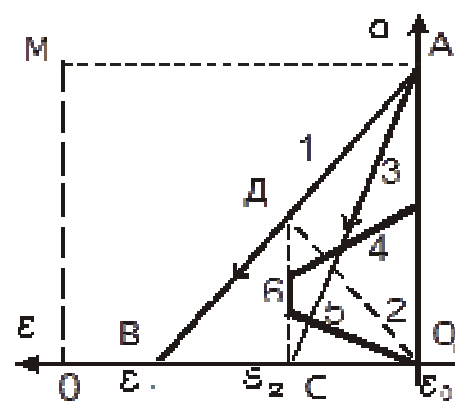
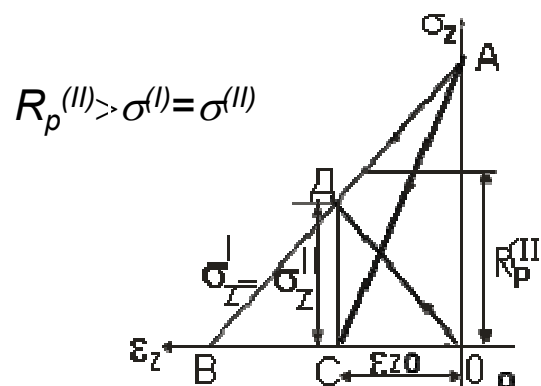
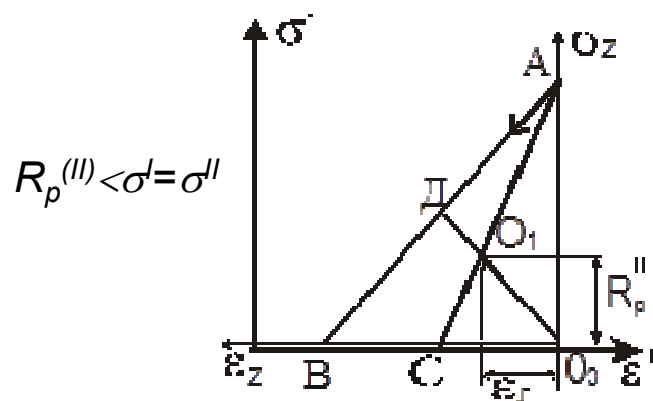
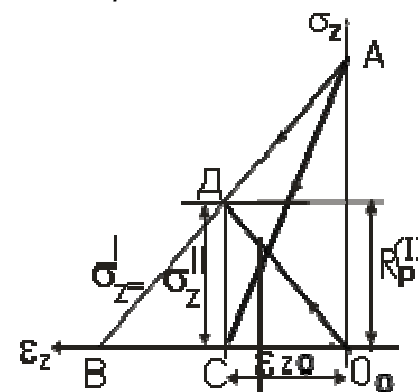


Рис.9. Графики изменения напряженно-деформированного состояния породы, образованной по схеме «нагрузка – цементирование», при разгрузке в зависимости от соотношения  $\sigma^{(I)}/R_p^{(II)}$



$R_p^{(II)} = \sigma^I = \sigma^{II}$ ,  
причем  $R_p^{(II)} \neq \Phi(t)$



Изменение зависимости  $\sigma = f(\epsilon)$  показано пунктиром. Деформация при разгрузке равна:

$$\epsilon_z = \epsilon_i + \epsilon_{\Gamma}$$

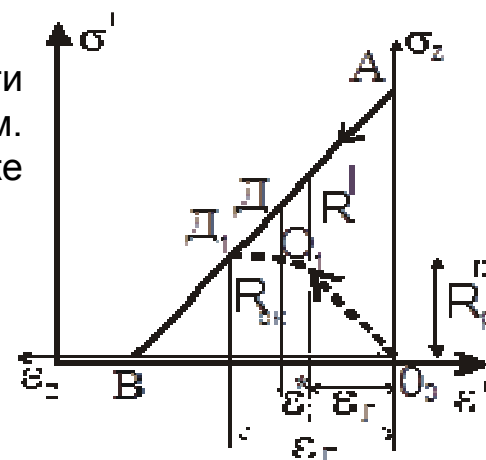
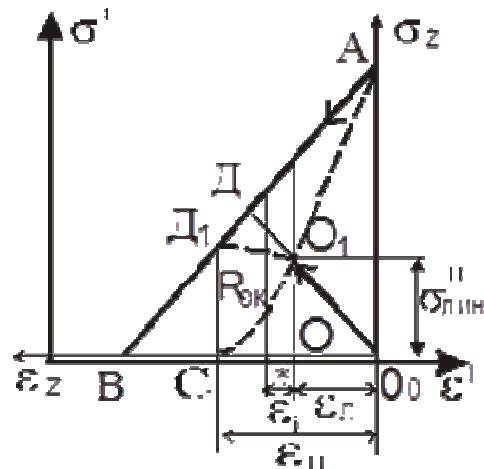


Рис.10. Результирующие зависимости  $AC$  и  $AB_1B_2$  при достижении биполярными напряжениями уровня, при которых образуются дефекты

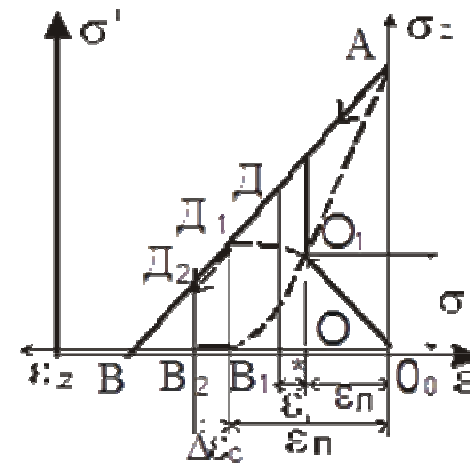


Текущее значение полной деформации определяется формулой:

$$\varepsilon_{n,i} = \varepsilon_{\text{л}} + \varepsilon_i^* = 1/E_2 \sigma_{\text{пред}}^{II} + \Phi [(\sigma^I - \sigma^{II}), t]$$

$\varepsilon_{\text{л}}$  – участок линейной относительной деформации,

$\varepsilon_i^*$  – текущее значение относительной деформации после линейного участка

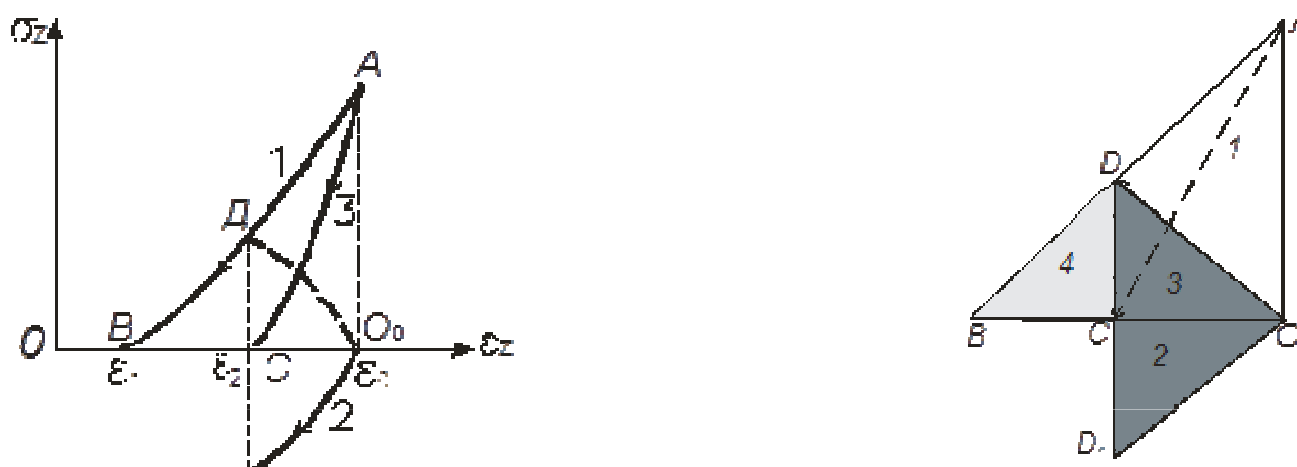


Общая деформация равна  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{л}} + \Delta\varepsilon_c$ , при этом величина приращения деформаций  $\Delta\varepsilon_c$  может трактоваться как упругое последствие. Для учета эффекта самонапряженного состояния традиционную формулу можно записать в виде:

$$\varepsilon = 1/E \sigma + \Delta\varepsilon_c$$

где  $\Delta\varepsilon_c$  является функцией разности напряжений в структурах, времени и др.

Рис.10а. Зависимости  $\sigma=f(\varepsilon)$  при разгрузке для элементов породы (а), и схема распределения составных частей потенциальной энергии после разгрузки (б)



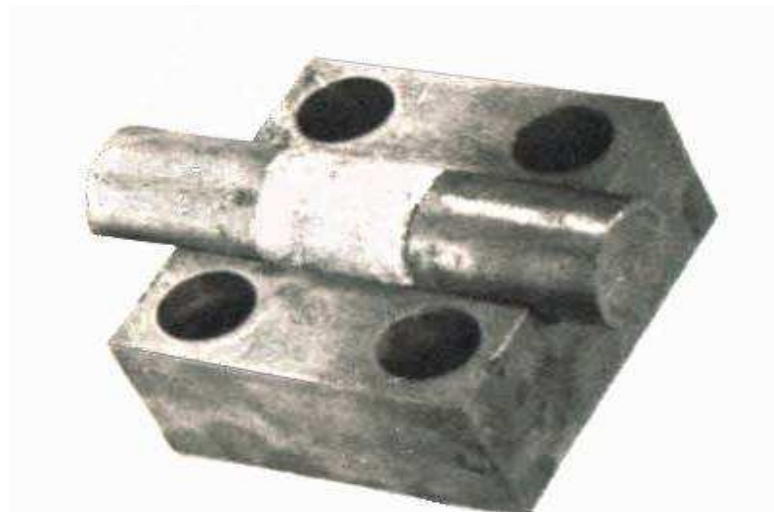
Площадь, ограничиваемая результирующей зависимостью 3 в диапазоне изменения деформаций от  $\varepsilon_0$  до  $\varepsilon_2$ , определяется зависимостями для отдельных систем напряжений в этом интервале. Поэтому

$$\int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_0} f_1(\varepsilon_0 - \varepsilon) d\varepsilon - \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_0} f_{II}(\varepsilon_0 - \varepsilon) d\varepsilon = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_0} f_{III}(\varepsilon_0 - \varepsilon) d\varepsilon$$

Для случая когда эти зависимости являются линейными диаграмма распределения потенциальной энергии после разгрузки образца может быть представлена в виде суммы площадей треугольников 4 (остаточная энергия первого поля) и 2 (или, что то же самое 3 – эту часть энергии накопило в процессе разгрузки второе поле):

$$\mathcal{E}_n = \int_{\varepsilon_2}^{\varepsilon_1} f_1(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_2} f_{II}(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Рис.11. Форма с цилиндрической полостью для изготовления моделей породы в различных последовательностях приложения внешней нагрузки



Для проверки теоретических положений выполнены экспериментальные исследования схемы «нагружение – цементирование» в широком диапазоне изменения давлений на скелет

Рис.12. Сравнение образцов бетона после разгрузки, сформированных по различным схемам (справа образец расслоился на диски)

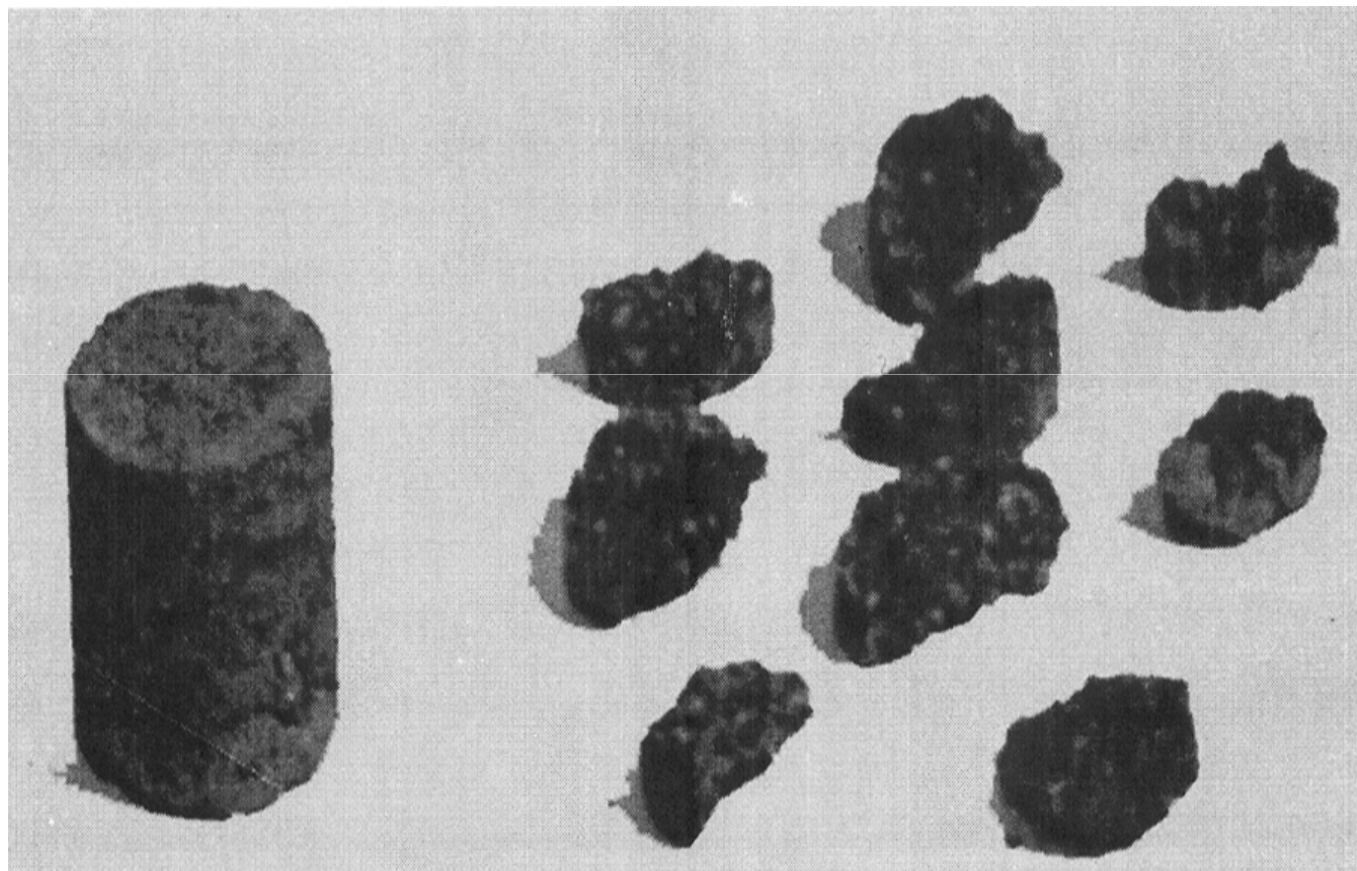
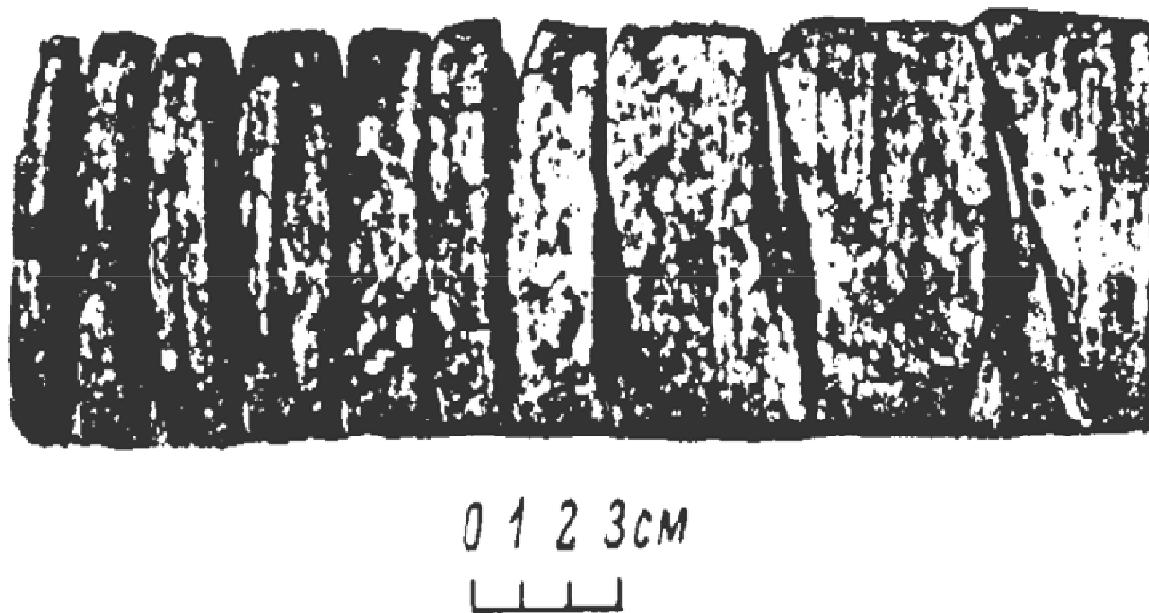


Рис. 13. Керн горной породы, разрушенный на диски, после извлечения из глубокой (более 1000 м) вертикальной скважины



Направление расслоения - по нормали к оси скважины

## Результаты экспериментальных исследований.

Рис.14. Изменения скоростей ультразвука после разгрузки образцов, изготовленных по схеме “нагружение (4,5 МПа) - цементирование”

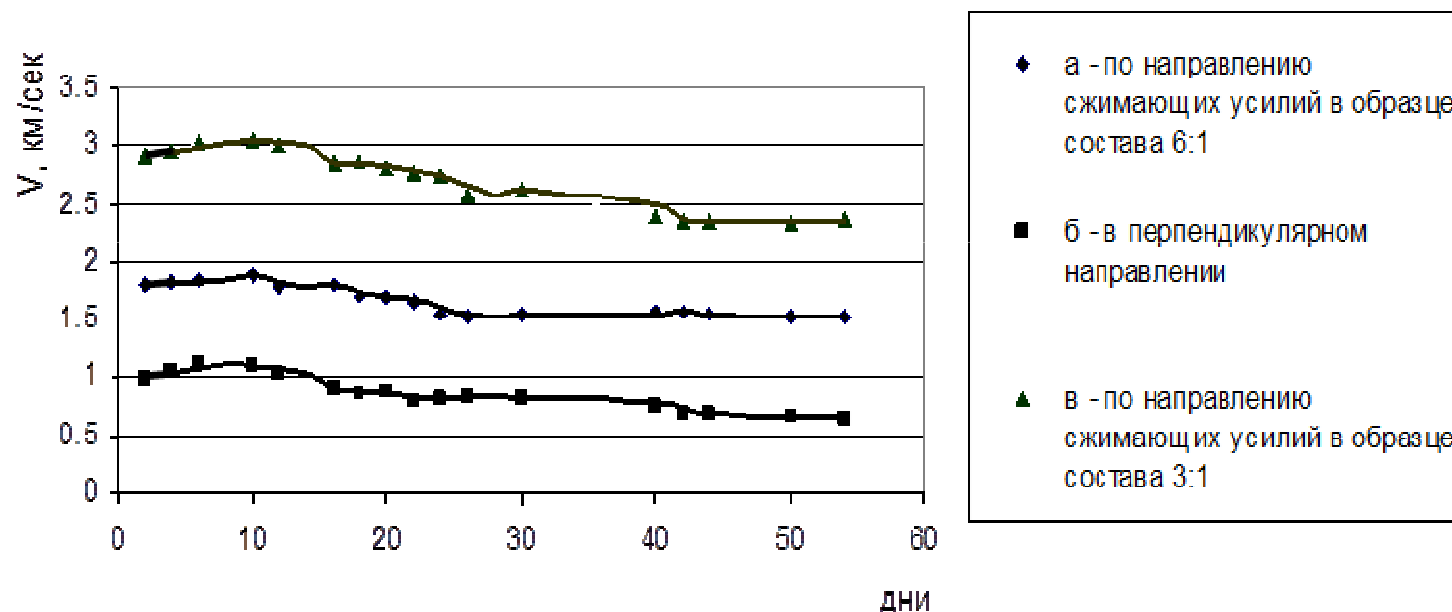
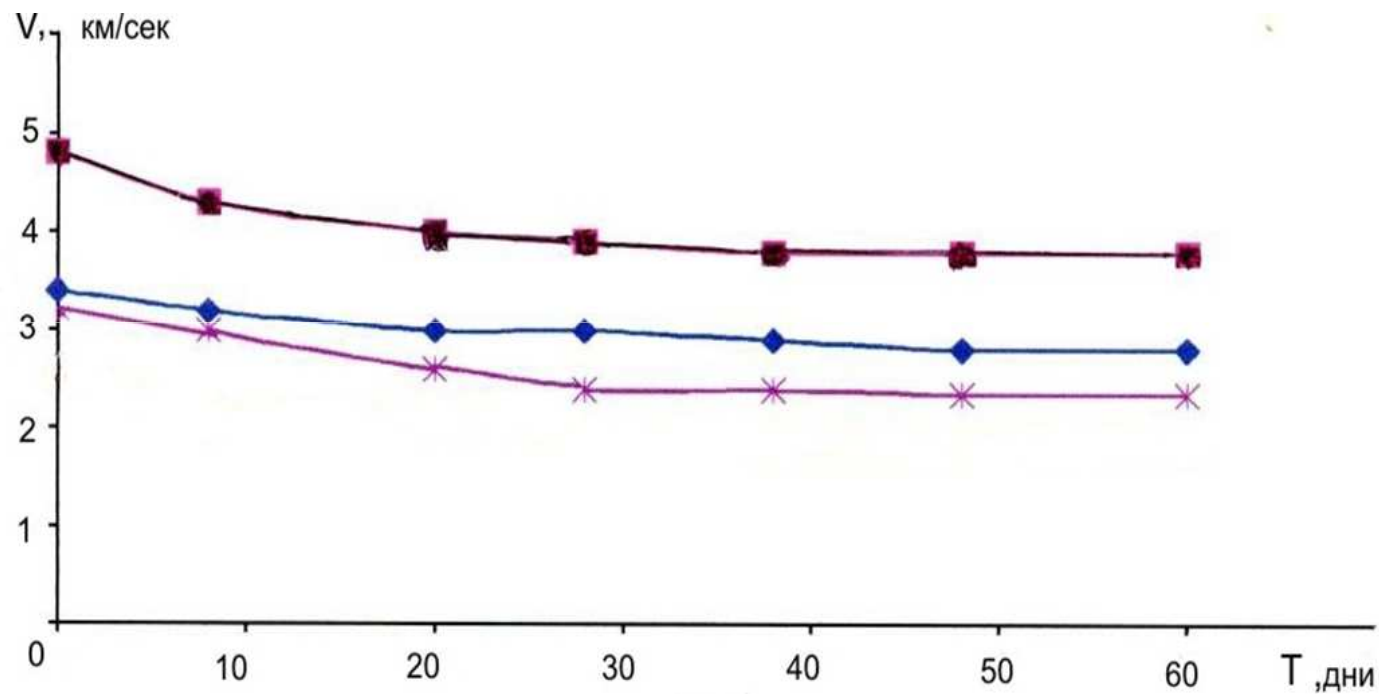


Рис.15. Изменение скорости ультразвука ( 20 кГц) прибором УК-14П во времени для образцов песчаника (верхняя зависимость) и алевролита (нижние кривые) во времени после извлечения их из забоя



## ВЫВОДЫ

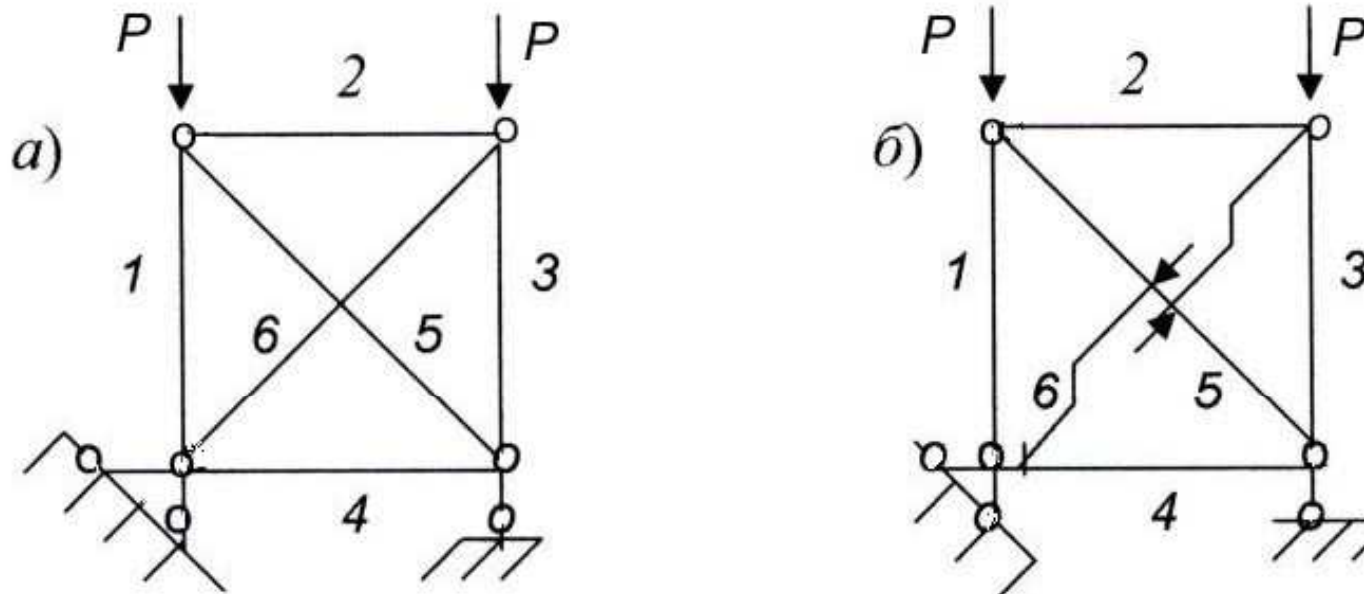
1. Разработанная модель горной породы в главных чертах отражает механизм образования остаточных напряжений после разгрузки, объясняет причину, физическую сущность и последствия возникновения самонапряженного состояния, развивающая применительно к горной породе концепцию двух систем механических напряжений в механике грунтов.

2. Показано, что процесс изменения напряженно-деформированного состояния массива пород при разгрузке необходимо рассматривать с учетом предшествующей истории, в частности, последовательности образования напряженного состояния породы в условиях гравитации и связанным с ней формированием двух полей механических напряжений, несущих различную силовую нагрузку. Суперпозиция этих полей при разгрузке, препятствуя полной реализации накопленной упругой энергии, приводит к возникновению остаточных напряжений с переходом породы в состояние самонапряжения.

3. Установлено, что основными показателями самонапряженного состояния породы являются эффекты после разгрузки: упругое последствие, образование дефектов, характеризующееся различными признаками: выделением, в частности, звуковой энергии, изменением механических параметров, а также несовпадение ветвей повторных нагружений и разгрузок. Начало возникновения самонапряженного состояния происходит на конечном участке разгрузки, примерно на уровне 75-80% от начального давления.

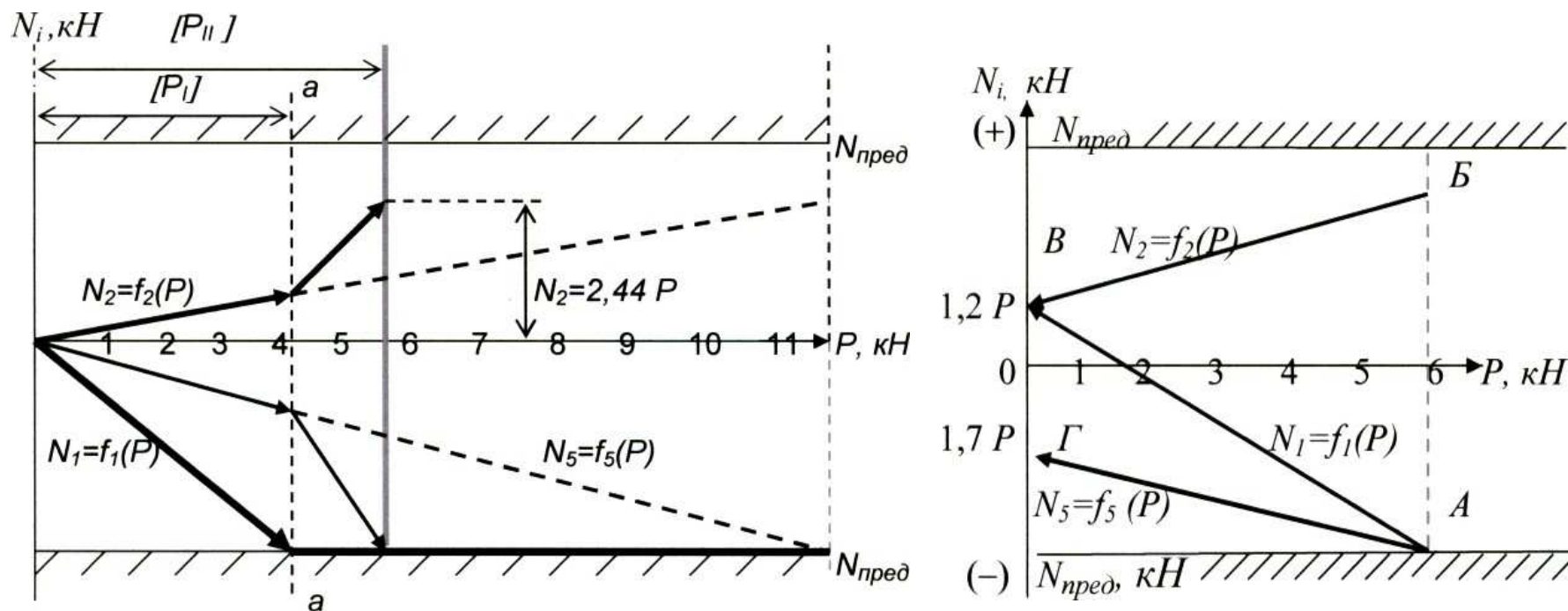
**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

Рис.16. Структурная модель породы в виде статически неопределимой системы ; а) – расчетная схема, б) – основная система



За основу анализа взяты известные положения о напряженном состоянии раздельно-зернистой среды как статически неопределимой системы и об аналогии ее с пространственной конструкцией – фермой (предложение Н.М. Герсегованова), а также подход акад. Ю.Н. Работнова, изложившего основные идеи теории упругих и пластических сред на примере простых стержневых систем.

Рис.17. Характер изменения усилий  $N_i$  в элементах фермы при нагружении (а) и при разгрузке (б) в зависимости от внешней нагрузки  $P$ .  $N_{пред}$  определяет несущую способность элементов системы в упругой стадии



Знаки (+) и (-) означают соответственно растяжение и сжатие. Остаточные усилия составляют 23% от действовавшей нагрузки  $P$ .

Рис.18. Схематическое изображение многоэлементной контурной модели (а) и графическое представление зависимости между напряжениями и деформациями при циклическом нагружении модели (б)

