

УДК 622.011.4 + 622.023

© 1998 г. К.С. Султанов

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЗАКОН ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЯГКИХ ГРУНТОВ

На основе модели упругого и вязкоупругого (стандартно-линейного) тела строится нелинейное уравнение состояния для моделирования объемного деформирования мягких грунтов. Модули объемного сжатия при этом считаются нелинейными функциями некоторого параметра характеризующего структурные разрушения грунта. Показана возможность, в рамках рассматриваемого закона, описания наблюдаемых эффектов при объемном сжатии грунтов. Приводятся результаты параметрического анализа предлагаемого уравнения состояния.

Наиболее завершенной из имеющихся моделей деформирования грунтовых сред является модель [1, 2], учитывающая, кроме реологических, все основные механические свойства грунтов, существенные для динамических процессов (нелинейная и необратимая объемная деформируемость, упруго-пластический сдвиг, зависимость предела упругости при сдвиге от давления). Подробный обзор работ, посвященных разработке уравнения состояния и экспериментальному обоснованию модели грунтов приведен в [3].

Была предложена [4, 5] модель объемного деформирования грунта, учитывающая вязкие свойства среды. На основе результатов экспериментальных исследований по динамическому деформированию грунтов [6–9], а также в развитие модели [1, 2] были предложены [9]¹ уравнения состояния грунтовых сред, учитывающие релаксационные свойства грунта.

Модель грунта, предложенная в [1, 2], дальнейшее развитие получила также в работах [4–7], в основном в плане уточнения и совершенствования закона объемного деформирования; закон сдвигового деформирования оставался прежним. Были также рассмотрены [6–8] модели грунтов при учете более сложных экспериментальных факторов.

Предлагаемый ниже нелинейный закон объемного деформирования грунтов с переменными модулями объемного сжатия основан на подходе, рассмотренном ранее при разработке законов взаимодействия твердых тел с грунтом [10, 11].

1. Принципы построения предлагаемого уравнения состояния. В связи с тем, что грунты не выдерживают каких-либо значительных растягивающих напряжений, рассматриваются только сжимающие напряжения. При сжатии грунта, находящегося в естественном состоянии, как показывают результаты экспериментов [4–9], происходит разрушение его структурных связей. Когда сжимающее напряжение достигает некоторого определенного значения, структурная связь полностью разрушается. При этом проявляются дилатансионные свойства (в зависимости от соотношений главных сжимающих напряжений), меняется плотность и соответственно объем грунта, а также значения его механических характеристик. В процессе деформирования особенно существенно меняют свои первоначальные значения модули сжатия грунта. Как показывают результаты опытов, значение модуля сдвига при сдвиговом деформировании грунта изменяется на порядок и больше [10, 11].

¹ Кулинич Ю.В., Нарожная З.В., Рыков Г.В. Механические характеристики песчаных и глинистых грунтов с учетом их вязкопластических свойств при кратковременных динамических нагрузках: Препринт № 69. М.: ИПМ АН СССР. 1976. 50 с.

Здесь рассмотрим закон объемного деформирования, считая, что модуль объемного сжатия грунта является функцией структурных разрушений грунтовой среды.

Предполагается, что с началом процесса сжатия начинают разрушаться структурные связи грунта, а после достижения объемной деформацией θ значения θ_* они полностью разрушаются (значения объемной деформации θ и давления P при сжатии считаются положительными). Степень разрушенности (фракционирования) считается зависящей от скорости приложения нагрузки к грунтовой среде. В некоторых случаях при увеличении давления в процессе разрушения начинается уплотнение разрушенного грунта. При этом происходит увеличение модуля сжатия грунта K до достижения некоторого значения объемной деформации $\theta = \theta_{**}$, а дальнейшее увеличение сжимающего давления не влияет на значения механических характеристик грунтов.

Необходимо отметить, что после достижения объемной деформацией значения $\theta = \theta_*$ увеличение модуля сжатия грунта происходит не для всех видов грунтов, а лишь для таких грунтов, при сжатии которых после разрушения вновь образуются структурные связи между его частицами. Увеличение модуля сжатия зависит также от влажности грунта. Например, после полного разрушения лессовых грунтов с влажностью 15–20% увеличение давления приводит к слипанию грунта и соответственно плотность грунта растет, что в свою очередь приводит к увеличению модулей сжатия грунта. Такая картина наблюдается также для суглинков, супесей, песков при их влажности 15–20%.

Для сухих грунтов и горных пород увеличение сжимающего давления после разрушения не всегда приводит к увеличению модуля объемного сжатия грунта. При малых значениях влажности грунты и горные породы (гранит, базальт, мрамор, туф и т.д.) после их полного разрушения не вяжутся, не слипаются, а остаются в разрушенном состоянии. В этих случаях с увеличением сжимающего давления увеличения модуля объемного сжатия грунта не происходит.

На основании сказанного выше рассматривается два варианта закона объемного деформирования: для сухих, хрупких, не слипающихся после разрушения и для слипающихся, влажных грунтов.

Закон объемного сжатия грунта, при допущении, что модуль объемного сжатия – функция разрушения среды, является нелинейным.

В общем виде закон деформирования грунта имеет вид [1, 2]

$$P = f(I_s, \theta), \quad \frac{d\tilde{S}_{ij}}{dt} + \lambda S_{ij} = 2G e_{ij} \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{1}{2J_2} \left(2GW - \frac{dJ_2}{dt} \right), \quad W = S_{ij} e_{ij}, \quad J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$$

Здесь S_{ij} , e_{ij} – девиаторы тензора напряжений и скоростей деформаций соответственно, тильда означает производную по Яуманну [2], функционал $\lambda > 0$ при $J_2 = (J(P))^2$, $\lambda \equiv 0$ при $J_2 < (J(P))^2$, $J(P)$ – функция, определяющая обобщенное условие текучести Мизеса [6, 7], G – модуль сдвига, связанный с модулем объемного сжатия известным соотношением

$$G = K(1 - 2\mu)/(1 + \mu) \quad (1.2)$$

где μ – коэффициент Пуассона для грунта.

В качестве параметра, характеризующего степень разрушенности грунта, принимаем $I_s \in [0, 1]$. Модуль объемного сжатия грунта считается функцией параметра разрушения $K = K(I_s)$. Следовательно, согласно (1.2) модуль сдвига грунта также является функцией параметра разрушения.

В (1.1) на уравнение $P = f(I_s, \theta)$ накладываются определенные условия, которые рассматриваются ниже.

С учетом вышеупомянутых предположений рассмотрим законы объемного сжатия грунтовой среды. Сдвиговые деформирования грунта описываются теми же уравнениями (1.1), предложенными в [2].

2. Нелинейный упруго-пластический закон объемного деформирования грунта. Далее для краткости слово "объемный" будем опускать. Базовым уравнением состояния служит модель линейно-упругой среды. В случае, когда модуль сжатия – функция структурного разрушения грунта, уравнение состояния такой среды имеет вид

$$P = K_e(I_s)\theta \text{ при } d\theta/dt \geq 0 \quad (2.1)$$

$$P = K_R(I_s)\theta \text{ при } d\theta/dt < 0 \quad (2.2)$$

Для хрупких, сухих грунтов значение $K_e(I_s)$ определяется соотношением

$$K_e(I_s) = K_* \exp(\alpha(1 - I_s)), \quad I_s = \theta / \theta_* \quad (2.3)$$

Для мягких, слипающихся, влажных грунтов при $0 \leq \theta \leq \theta_*$ и $dP/dt < 0$

$$K_e(I_s) = K_t \exp(\beta(I_s - 1)), \quad I_s = \theta / \theta_t \quad (2.4)$$

Для этих типов грунтов при $0 \leq \theta \leq \theta_*$ и $dP/dt \geq 0$ выполняется соотношение (2.3).

Модуль разгрузки меняется по закону

$$K_R(I_s) = K_{RN} \exp(\gamma(I_s - 1)), \quad I_s = \theta / \theta_R \quad (2.5)$$

В соотношениях (2.1) – (2.5) P – сжимающее давление, θ – текущее значение деформации, θ_* – значение деформации при котором происходит полное структурное разрушение грунта, θ_t – значение деформации при $dP/dt < 0$, $0 < \theta_t < \theta_*$, θ_R – значение деформации, соответствующее началу разгрузки при $d\theta/dt < 0$, α, β, γ – безразмерные параметры, характеризующие степень изменения модулей сжатия и разгрузки K_e и K_R соответственно, K_* – модуль сжатия полностью разрушенного грунта, K_t – значение модуля сжатия грунта при $\theta = \theta_t$, K_{RN} – начальное значение модуля разгрузки.

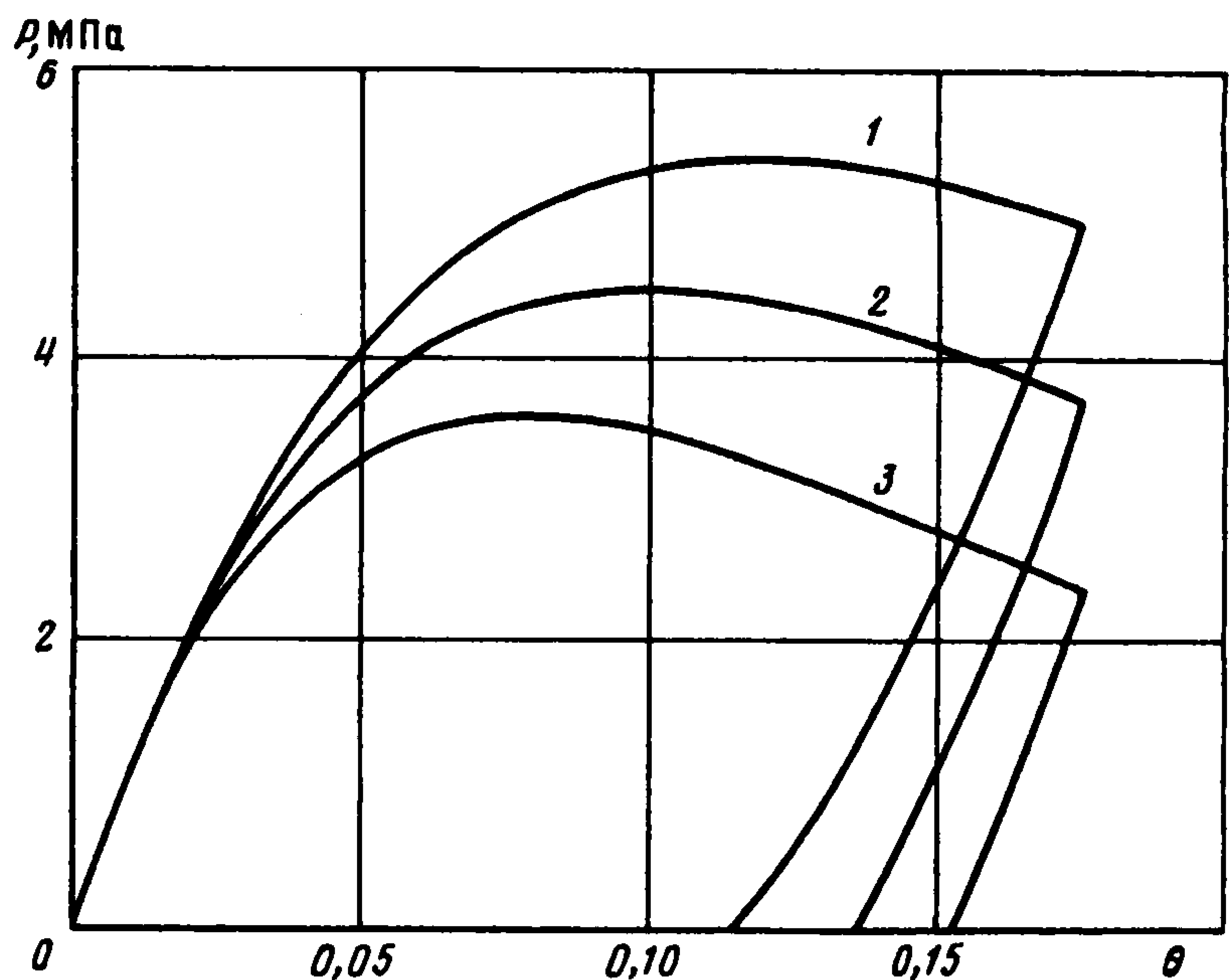
Для проведения качественного анализа предлагаемого уравнения состояния (2.1) и (2.2) построим диаграммы сжатия грунта $P(\theta)$. Для этого давление P определим, задавая изменение деформации в виде

$$\theta = \theta_m \sin(\pi t/T) \quad (2.6)$$

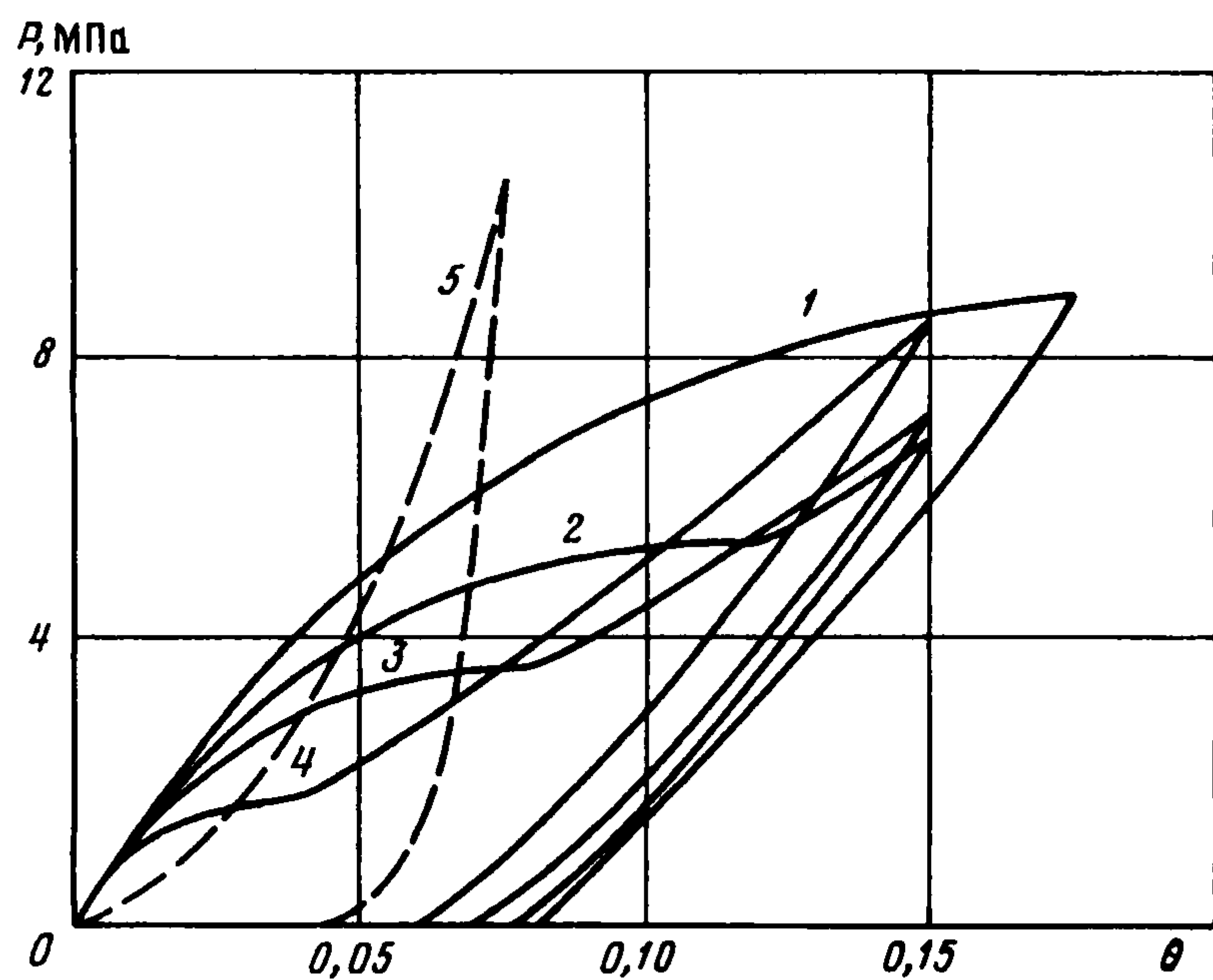
где θ_m – максимальная деформация, t – время, T – полупериод изменения деформации.

Сначала рассмотрим зависимости $P(\theta)$ для хрупких грунтов. В этом случае воспользуемся уравнениями (2.1)–(2.3). Диаграмма сжатия грунта, полученная при значениях параметров модели $K_* = 10$ МПа; $\alpha = 2,5$; $\beta = 0,1$; $\gamma = 1,0$; $K_{RN} = K_* \exp \alpha$ и $\theta_m = 0,175$; $T = 0,4$ с, приведена на фиг. 1.

Кривые 1–3 на фиг. 1 относятся к значениям $\theta_* = 0,3$; $0,25$ и $0,2$ соответственно. При всех значениях θ_* давление с увеличением деформации увеличивается, достигает максимума, далее уменьшается. После достижения деформацией максимального значения $\theta = \theta_m$ начинается разгрузка. В соответствии с уравнением (2.2) разгрузка



Фиг. 1



Фиг. 2

ного давления и остаточной деформации. Конкретные значения параметров модели должны определяться из экспериментов для конкретного вида грунта. Методы определения α , β , γ приведены в [10]. Значения K_* и K_{RN} определяются методами, описанными, например, в [4, 5].

По существу модули сжатия, определяемые по уравнениям (2.3)–(2.5), являются секущими модулями диаграммы $P(\theta)$.

Действительно, при сжатии грунт, претерпевая структурные разрушения, меняет свои механические свойства. В результате каждому значению деформации θ соответствует определенное состояние материала грунта и, следовательно, имеется конкретное значение модуля сжатия, соответствующее именно данному состоянию. Если бы данное состояние было конечным состоянием грунта, то значение модуля сжатия далее оставалось бы постоянным. Однако для грунта такого состояния, видимо, не существует. Любое структурное состояние грунта под действием различных нагрузок может быть изменено.

Обычно в опытах определяются значения механических характеристик грунтов разрушенной структуры. Поэтому при составлении уравнений модели исходили из этого положения. В то же время не исключаются другие разновидности уравнений (2.3)–(2.5).

На фиг. 2 приведены зависимости $P(\theta)$ в случае выполнения соотношений (2.3)–(2.5). Кривые 1–5 соответствуют к значениям $\theta_* = 0,5; 0,3; 0,2; 0,1; 0,01$. В случае кривой 5 $K_{RN} = 10K_* \exp \alpha$. Значения остальных параметров модели оставались без изменения.

Диаграммы сжатия грунта качественно отличаются от предыдущего случая: отсутствует "ниспадающий" участок, после некоторого нарастания деформации начинается интенсивный рост давления и разгрузки при $d\theta/dt < 0$.

Эти диаграммы соответствуют мягким слипающимся грунтам, например лессам с влажностью 15–25% [4–9]. В этих случаях при сжатии грунта его структура также начинает разрушаться, однако через некоторое время под действием сжимающего давления разрушение подавляется. Структурные изменения в этом случае происходят при увеличении модуля сжатия. Фактически грунт начинает слипаться и становится более прочным. Увеличение модуля сжатия грунта начинается с момента $dP/dt < 0$, соответствующего переходной точке на диаграмме $P(\theta)$, где $\theta = \theta_r$. Как видим из фиг. 2, значение θ_r зависит от θ_* . С уменьшением θ_* величина θ_r также уменьшается (кривые 1–4). При $\theta_* = 0,01$, что означает незначительную структурную прочность грунта, зависимость $P(\theta)$ соответствует диаграмме разрушенного грунта (кривая 5).

Очевидно, что здесь, также варьируя значения параметров модели, можно полу-

также происходит нелинейным образом. На всех стадиях диаграммы $P(\theta)$ модули сжатия и разгрузки являются в рассматриваемом случае убывающими функциями деформации. Это позволяет описать уравнениями (2.1) "ниспадающий" участок диаграммы, наблюдаемый в экспериментах. Как видно из фиг. 1, θ_* – параметр, характеризующий структурную прочность грунта. Уменьшение θ_* приводит к уменьшению максимального давления.

Варьируя значения параметров модели α , β , γ , K_* , K_{RN} , очевидно, можно получить множество диаграмм $P(\theta)$ с различными значениями максималь-

чить разновидности диаграммы $P(\theta)$, соответствующие результатам конкретных опытов.

Уравнения состояния грунта (2.1), (2.2) при $\theta_* \rightarrow \infty$ переходят в модель линейно-упругой среды.

В рассматриваемой модели не учитываются временные эффекты, вязкие свойства грунта и т.д. Поэтому далее рассмотрим закон деформирования грунта с учетом этих характеристик на основе модели линейного вязкоупругого тела.

3. Нелинейный вязкопластический закон деформирования грунта. Рассмотрим линейное вязкоупругое (стандартно-линейное) тело. Считаем, что модули сжатия также являются функциями структурных изменений грунта. Тогда уравнения состояния грунтовой среды имеют вид

$$K_D^{-1}(I_s) \frac{dP}{dt} + K_s^{-1}(I_s) \mu_0(I_s) P = \frac{d\theta}{dt} + \mu_0(I_s) \theta \quad \text{при } d\theta / dt \geq 0 \quad (3.1)$$

$$K_R^{-1}(I_s) \frac{dP}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{при } d\theta / dt < 0 \quad (3.2)$$

где $K_D(I_s)$, $K_s(I_s)$, $K_R(I_s)$ – функции динамического, статического сжатия и разгрузки соответственно, которые характеризуют изменения этих модулей в зависимости от параметра разрушения I_s , μ_0 – параметр объемной вязкости грунта.

Функции изменения динамического и статического модулей сжатия грунта $K_D(I_s)$ и $K_s(I_s)$ для хрупких грунтов в пределах $0 \leq \theta \leq \theta_*$ определяются соотношениями

$$K_D(I_s) = K_{D*} \exp(\beta(1 - I_s)), \quad K_s(I_s) = K_{s*} \exp(\alpha(1 - I_s)) \quad (3.3)$$

где K_{D*} и K_{s*} – соответственно модули динамического и статического сжатия структурно-разрушенного грунта, β и α – безразмерные показатели, характеризующие степень изменения модулей сжатия грунта, $I_s = \theta/\theta_*$, θ_* – значение деформации при котором грунт претерпевает полное структурное разрушение.

Согласно (3.3) начальные значения модулей сжатия

$$K_{DN} = K_{D*} \exp \beta, \quad K_{sN} = K_{s*} \exp \alpha \quad (3.4)$$

Отсюда имеем

$$\alpha = \beta + \ln(\gamma_* / \gamma_N), \quad \gamma_* = K_{D*} / K_{s*}, \quad \gamma_N = K_{DN} / K_{sN} \quad (3.5)$$

В большинстве случаев из эксперимента определяются значения K_{s*} , а величина K_{D*} остается неизвестной. Поэтому для определения отношения модулей динамического и статического сжатия для структурно-разрушенного грунта предлагается выражение

$$\gamma_* = \gamma_N + (\gamma_m - \gamma_N)(\mu_N^{-1} d\theta / dt)^\kappa, \quad \mu_N = K_{DN} K_{sN} / [(K_{DN} - K_{sN}) \eta] \quad (3.6)$$

где γ_m – максимально возможное значение этого параметра для данного вида грунта, μ_N – параметр вязкости для грунта с ненарушенной структурой, η – коэффициент вязкости, κ – безразмерный показатель степени.

Согласно выражению (3.6) γ_* зависит от скорости деформирования. Действительно разрушение структуры грунта и его фракционирование считаются зависящими от скорости нагружения грунтовой среды. Значение γ_* тем больше, чем больше степень разрушения структуры (фракционирования) грунта.

Изменение параметра вязкости при изменении структуры грунта определяется соотношением

$$\mu_0(I_s) = \mu_* \exp(\alpha^0(1 - I_s)), \quad \mu_* = \mu_N / \gamma_*, \quad \alpha^0 = \ln(\gamma_*) \quad (3.7)$$

где α^0 – безразмерный показатель, характеризующий степень изменения параметра вязкости в зависимости от разрушения структуры грунта.

Значения параметров β , γ_m , κ определяются из результатов опытов. Далее, используя выражение (3.3)–(3.7), можно определить значения остальных параметров модели.

В рассматриваемом варианте модели согласно уравнению (3.1) разрушение грунта продолжается до момента $\theta = \theta_*$ при $d\theta/dt \geq 0$. Это справедливо для хрупких грунтов.

В случае слипающихся, влажных грунтов на диаграмме $P(\theta)$ в опытах не наблюдается "ниспадающего" участка. В этих случаях функции модели (3.1) определяются следующим образом:

$$K_D(I_s) = K_{Dt} \exp(\beta_t(I_s - 1)), \quad K_s(I_s) = K_D(I_s) / \gamma_{st} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_*, \quad dP/dt < 0 \quad (3.8)$$

Здесь $I_s = \theta/\theta_t$; θ_t , K_{Dt} , K_{st} – значения соответствующих параметров при $dP/dt < 0$. При $0 \leq \theta \leq \theta_*$ и $dP/dt \geq 0$ выполняются соотношения (3.3).

Согласно соотношениям (3.8) начиная с момента выполнения условия $dP/dt < 0$ давление начинает увеличиваться до тех пор, пока деформация растет. Возможно ограничение роста давления до достижения некоторого значения деформации θ_{**} . Увеличение давления и деформации приведут к подавлению разрушений структуры грунта, т.е. к увеличению секущих модулей грунта. При этом γ_{st} уменьшается. Для определения текущего значения γ_{st} предлагается выражение

$$\gamma_{st} = \gamma_{st0} - (\gamma_{st0} - \gamma_{**}) \left(\frac{\theta - \theta_t}{\theta_{**}} \right)^{\beta_0} \quad (3.9)$$

где γ_{**} – предельное значение γ_{st} при $\theta = \theta_{**}$, γ_{st0} – значение γ_{st} при $dP/dt < 0$, β_0 – безразмерный показатель степени.

После достижения деформации θ_{**} параметры модели остаются постоянными. Значения θ_{**} , γ_{**} и β_0 определяются из результатов опытов.

Модуль разгрузки $K_R(I_s)$, так же как в нелинейной упругопластической модели, определяется соотношением

$$K_R(I_s) = K_{RN} \exp(\beta_R(I_s - 1)), \quad I_s = \theta / \theta_R \quad (3.10)$$

где θ_R – значение деформации в момент $d\theta/dt < 0$, K_{RN} – начальное значение модуля разгрузки, β_R – безразмерный показатель, характеризующий степень изменения модуля разгрузки.

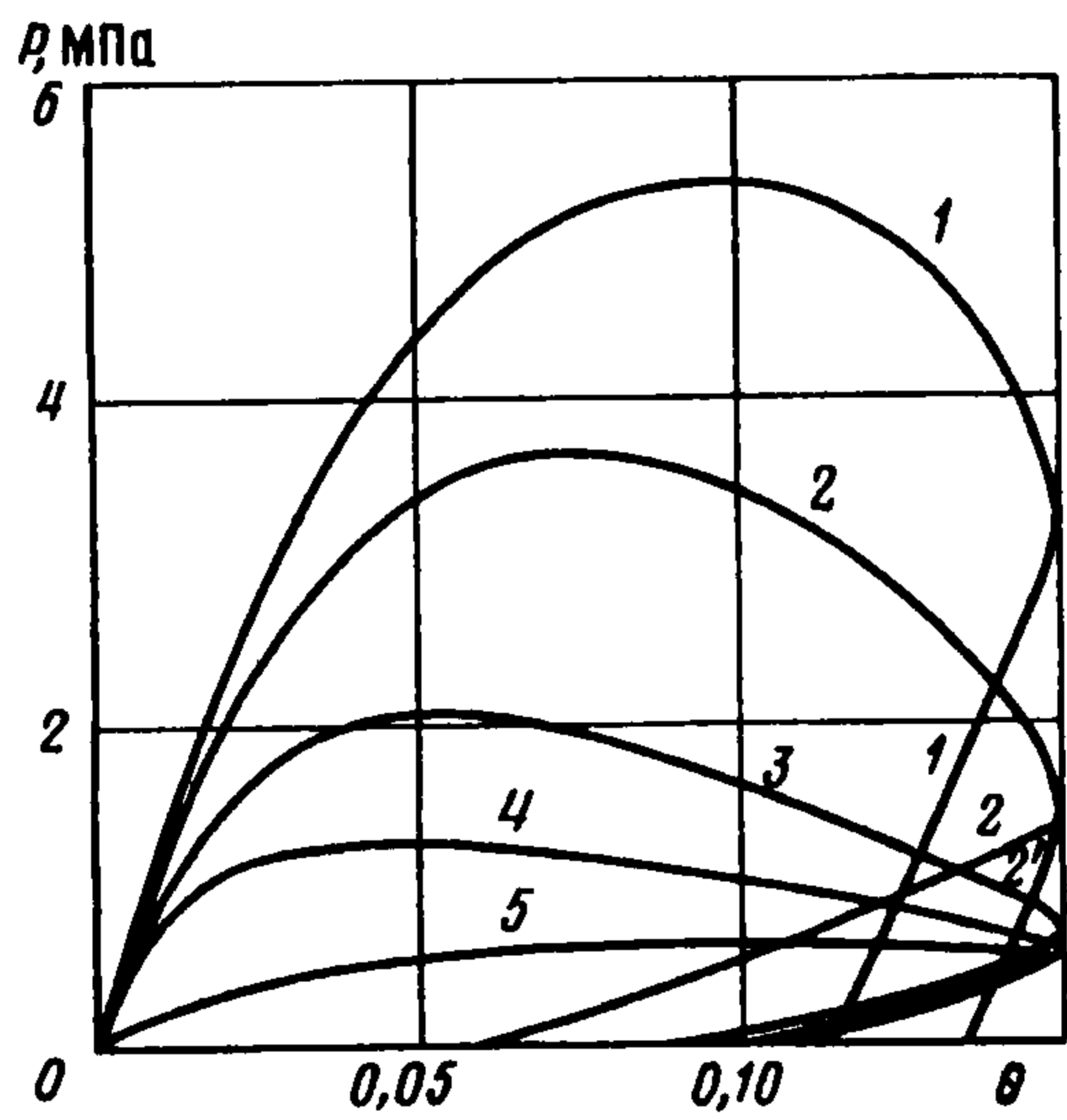
Рассмотрим поведение грунта, описываемое уравнениями (3.1), (3.2), задавая изменение деформации соотношением (2.6).

На фиг. 3 приведены изменения давления в зависимости от деформации для хрупких грунтов. Диаграммы $P(\theta)$ здесь получены при значениях параметров модели: $\beta = 0,5$; $K_{s*} = 10$ МПа; $\gamma_N = 1,1$; $\gamma_m = 10$; $\theta_* = 0,05$; $\beta_R = 3,0$ и нагрузки $\theta_m = 0,15$; $T = 0,4$ с. Кривые 1–5 соответствуют значениям $\mu_N = 10, 20, 50, 100$ и 1000 с^{-1} .

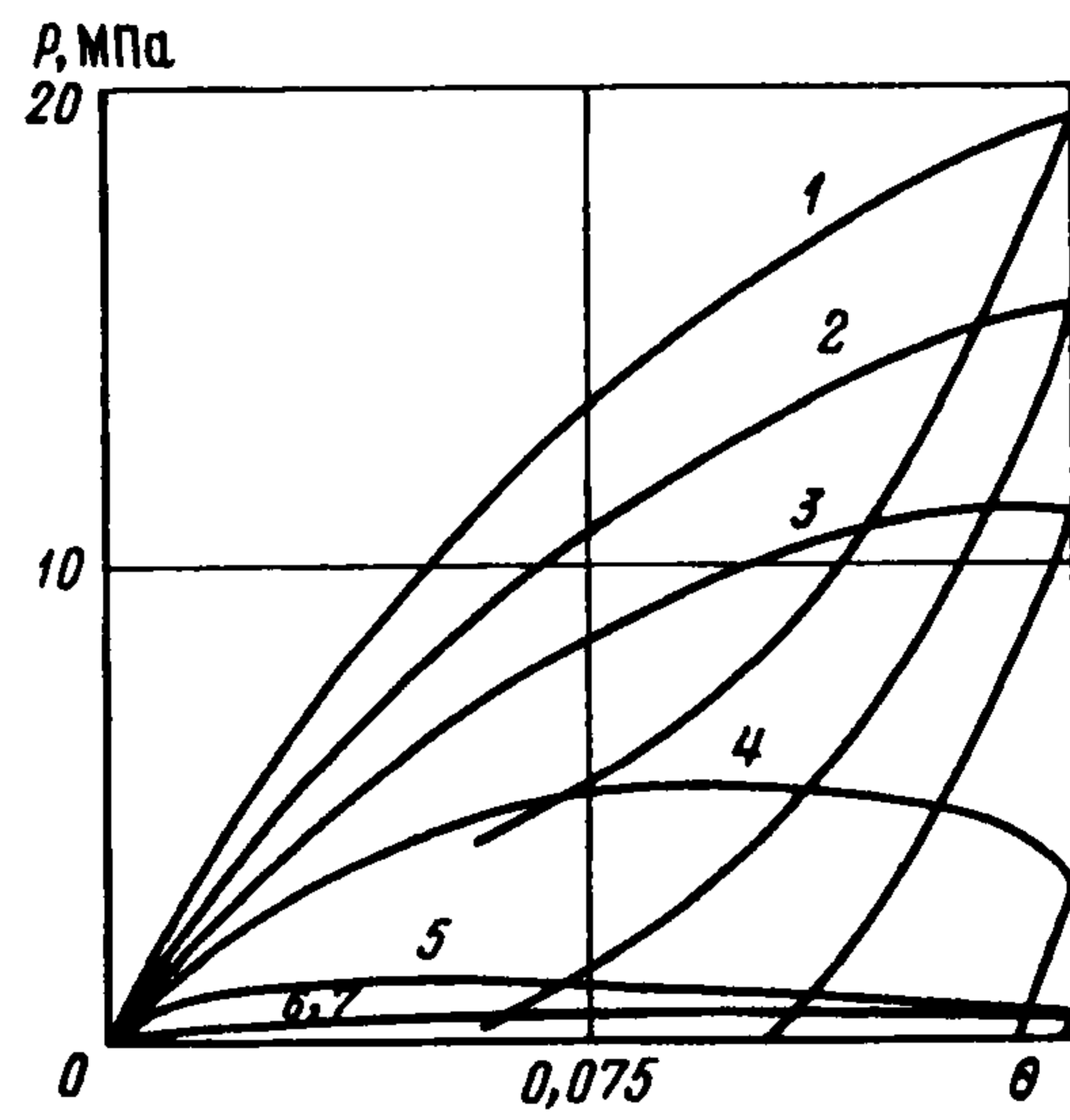
Как видно из фиг. 3, увеличение параметра вязкости μ_N , что соответствует уменьшению коэффициента вязкости, приводит к существенному количественному изменению в зависимостях $P(\theta)$. Увеличение коэффициента вязкости приводит к увеличению потери механической энергии, определяемой соответственно площадью диаграммы $P(\theta)$. Следовательно, это должно привести к увеличению коэффициента поглощения грунта, что не противоречит результатам опытов. Увеличение коэффициента вязкости также приводит к более заметному проявлению "ниспадающего" участка диаграммы $P(\theta)$.

Изменение давления при различных значениях μ_N показывает достаточную чувствительность модели к изменениям параметра вязкости (фиг. 3).

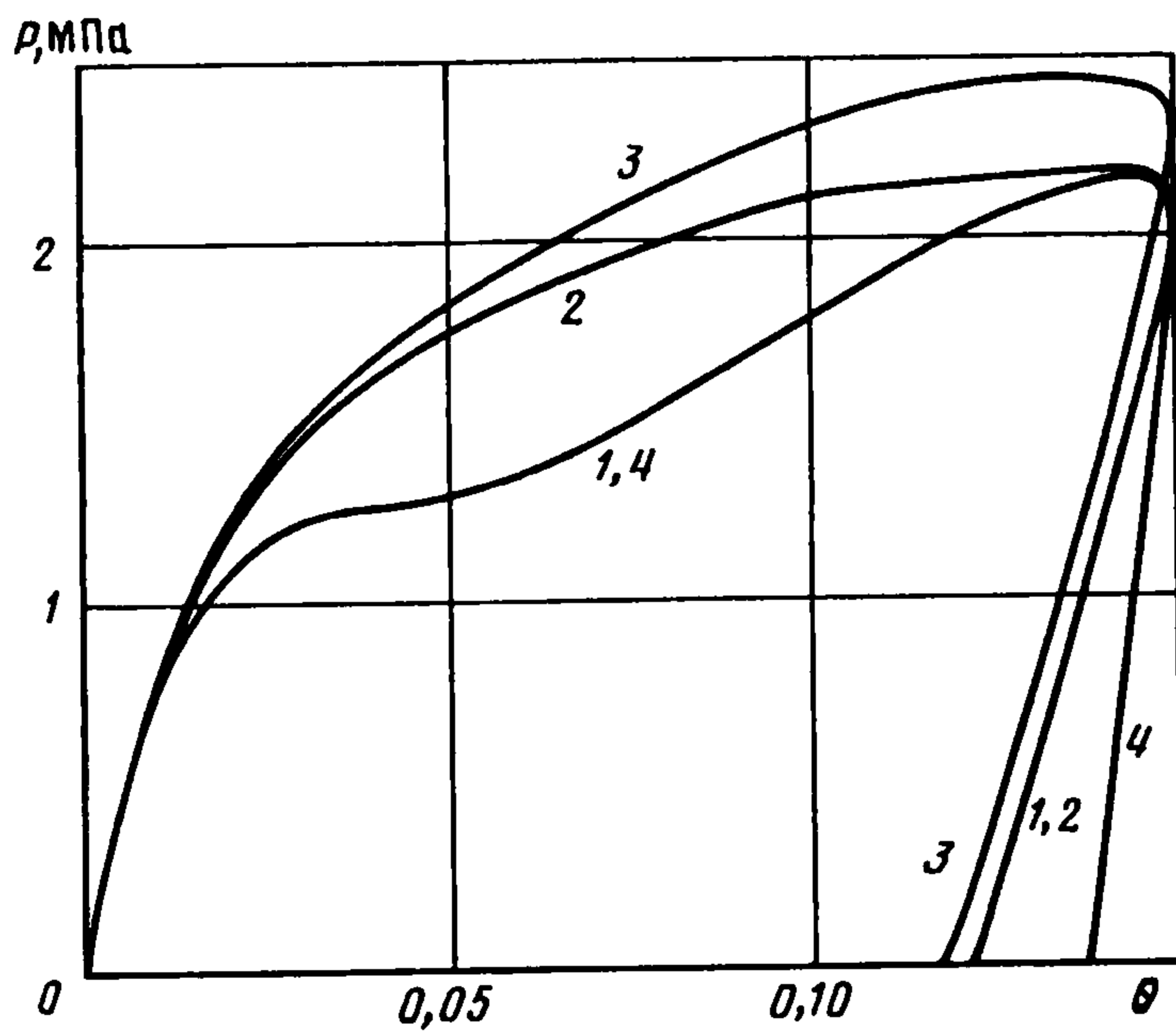
Варьируя значениями β_R и K_{RN} , можно получить различные кривые разгрузки. Разгрузочная ветвь 1 и 2' получена при $\beta_R = 0,5$ и $K_{RN} = 5K_{DN}$.



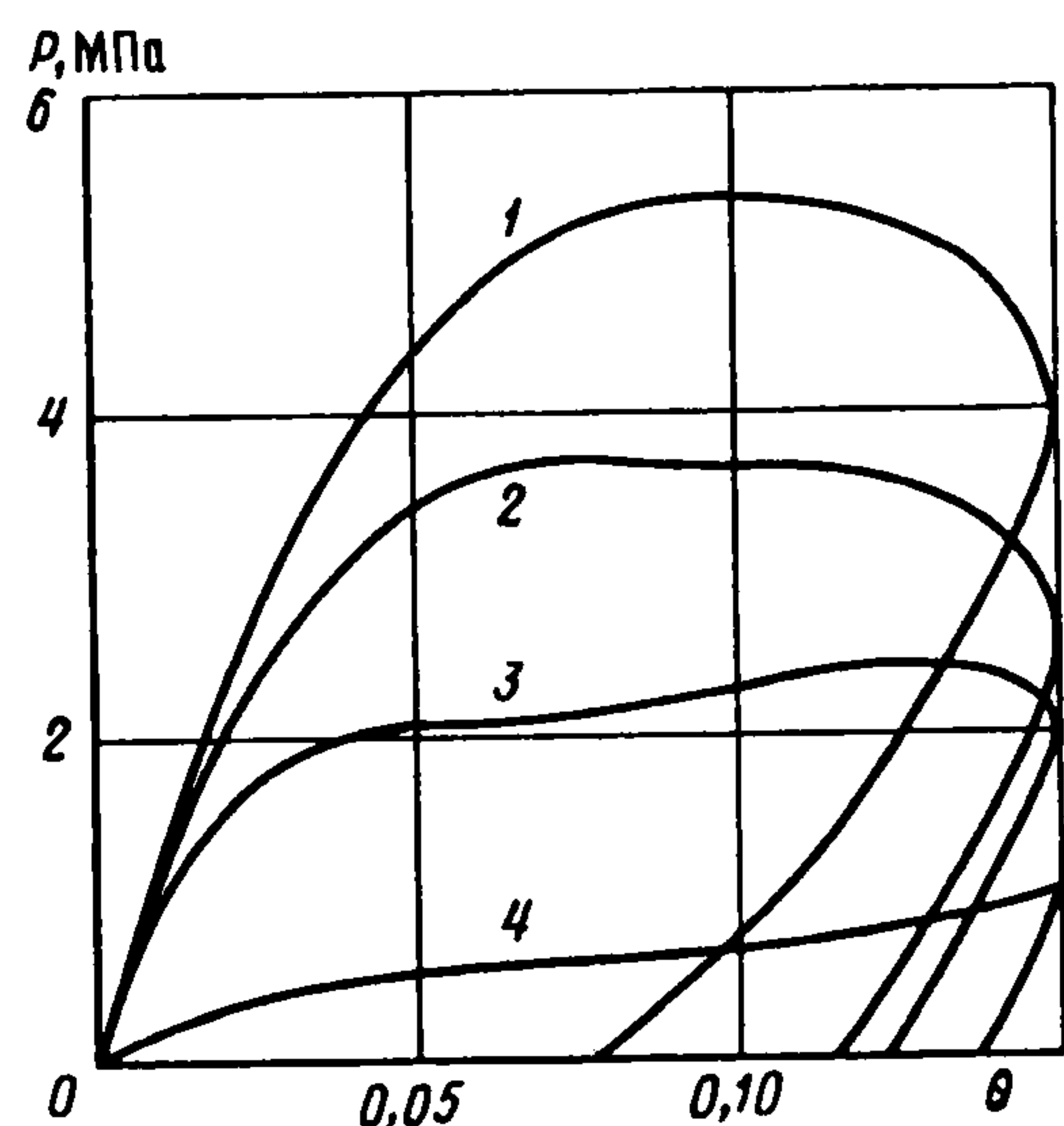
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

Фиксируя значения $\mu_N = 1000 \text{ с}^{-1}$, рассмотрим влияние изменения скорости деформирования на ход кривых $P(\theta)$ (фиг. 4).

Кривые 1–7 на фиг. 4 соответствуют значениям $T = 4 \cdot 10^{-6}, 4 \cdot 10^{-5}, 4 \cdot 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-2}, 1$ и 10 с . Видно, что изменение T , соответствующее согласно уравнению (2.6) изменению скорости деформирования, существенно влияет на диаграмму $P(\theta)$. Кривые 1–7 на фиг. 4 ориентировочно соответствуют значениям скорости деформирования $\theta = d\theta/dt = 10^6, 10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 4$ и $0,4 \text{ с}^{-1}$.

Согласно рассматриваемому уравнению состояния грунта при значениях $\theta = 1$ и 10 с^{-1} диаграммы $P(\theta)$ практически одинаковы (кривые 6, 7, фиг. 4). При дальнейшем увеличении скорости деформирования ход кривых $P(\theta)$ существенно меняется. Здесь также усиливаются поглощающие свойства грунта.

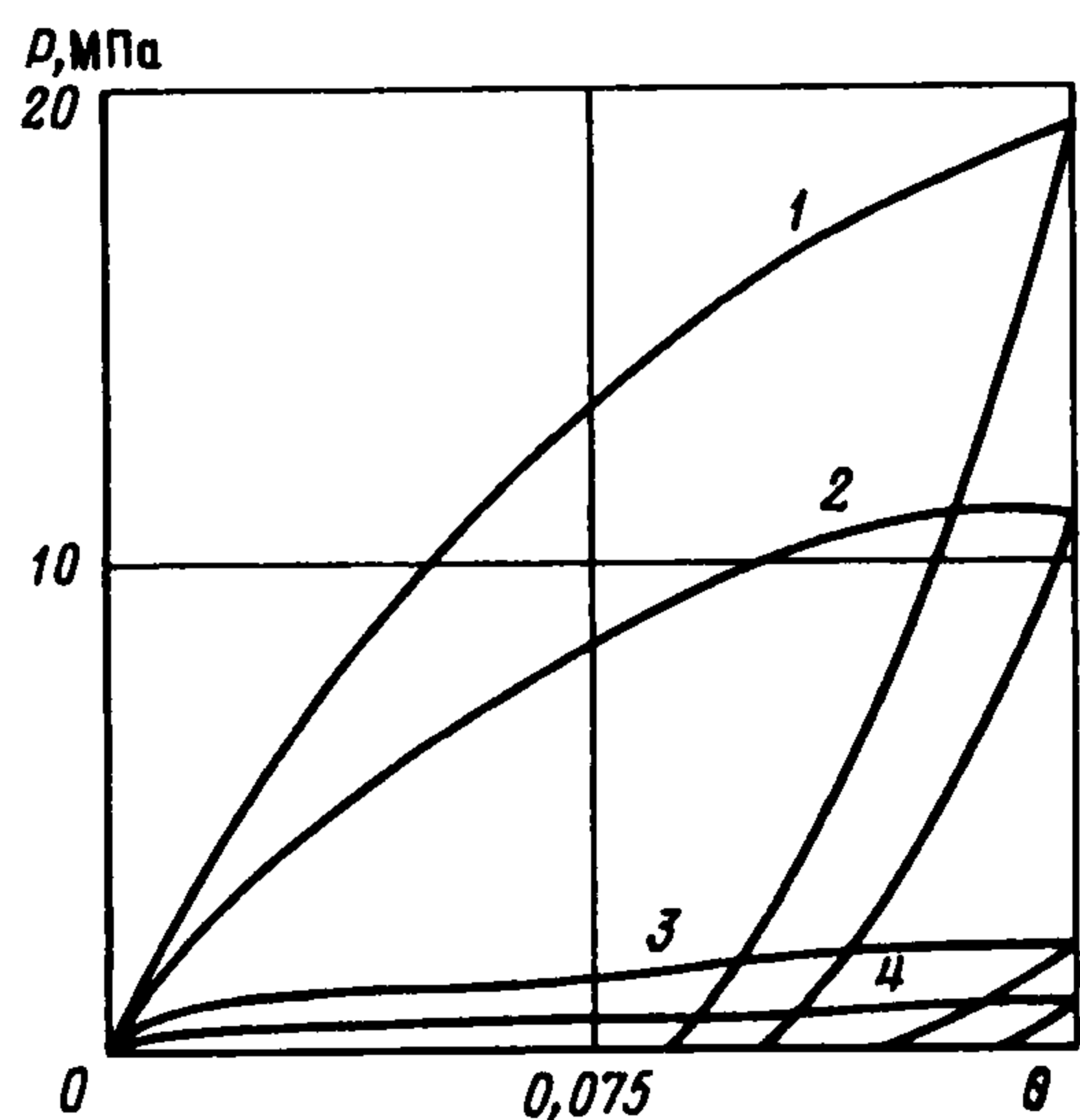
Согласно результатам расчетов изменение значений параметров модели $\beta, \gamma_N, \gamma_m, K_{s*}, \theta_*$ также влияет на ход кривых. Изменение зависимостей $P(\theta)$ при различных значениях параметров модели в целом не противоречат известным результатам опытов [4–9].

В случае мягких, слипающихся грунтов ход кривых $P(\theta)$ качественно отличается от аналогичных диаграмм для хрупких грунтов.

На фиг. 5 приведены зависимости $P(\theta)$ для мягких грунтов при учете соотношений (3.8) и (3.9) для следующих значений параметров: $\beta_l = 0,1; \beta_0 = 0,7; \gamma_{**} = 2$ и $\mu_N = 100 \text{ с}^{-1}$. Значения остальных параметров модели оставались без изменения.

Кривые 1–3 (фиг. 5) соответствуют значениям $\theta_* = 0,05; 0,1$ и $0,5$. Кривая 4 получена при $K_{RN} = 5K_{DN}$.

Для диаграмм $P(\theta)$ в случае мягких грунтов характерно изменение знака кривизны, что обсуждалось ранее [1, 2]. Увеличение θ_* приводит к увеличению поглощающих свойств грунта,



Фиг. 7

поскольку растягивается процесс разрушения грунта, что требует большего расхода механической энергии.

При фиксированных значениях параметров модели β , γ_N , γ_m , K_{s*} , β_1 , β_0 , γ_{**} , θ_* и $\theta_m = 0,15$, $T = 0,4$ с рассмотрим влияние изменений параметра (коэффициента) вязкости на ход кривых $P(\theta)$.

На фиг. 6 приведены зависимости, полученные при значениях параметра вязкости $\mu_N = 10, 20, 50, 1000 \text{ с}^{-1}$ (кривые 1–4). Увеличение μ_N (уменьшение коэффициента вязкости η) приводит к снижению поглощающей способности грунта. При больших значениях коэффициента вязкости изменения знака кривизны в зависимостях $P(\theta)$ не наблюдается (кривая 1). С увеличением вязких характеристик разрушения структуры происходят на начальных стадиях сжатия грунта и это сопровождается увеличением модулей сжатия грунта согласно соотношениям (3.8).

Влияние изменения скорости деформирования на ход кривых $P(\theta)$ рассмотрено при значениях $\dot{\theta} = d\theta/dt = 10^6, 10^4, 10^2, 1 \text{ с}^{-1}$ (кривые 1–4, фиг. 7). Значение параметра вязкости для этих кривых фиксировано: $\mu_N = 1000 \text{ с}^{-1}$. Увеличение скорости деформирования также приводит к усилению поглощающих свойств грунта. С ростом скорости деформирования разрушение грунта происходит также на ранних этапах сжатия грунта и, следовательно, изменения знака кривизны в зависимостях $P(\theta)$ не наблюдается.

Здесь, также варьируя значения параметров уравнения (3.10), можно получить различные ветви разгрузки, следовательно различные значения остаточных деформаций.

Результаты расчетов показывают, что предлагаемые нелинейные законы деформирования грунта в целом качественно не противоречат результатам известных экспериментальных исследований по испытанию грунтов [4–9]. Отметим, что в предлагаемой модели для описания "ниспадающего" участка диаграммы $P(\theta)$ нет необходимости введения дополнительного уравнения, как это было сделано ранее [4]. Процесс деформирования грунта, до стадии разгрузки, полностью описывается одним уравнением (3.1). Уравнения состояния грунта (3.1), (3.2), как видно из фиг. 3–7, учитывают основные свойства грунтов.

Уравнения состояния при учете разрушений структуры грунта аналогичным образом можно сформулировать для сдвигового деформирования грунтовой среды.

Однако в данном случае, считая, что объемная деформация превалирует над сдвиговыми, ограничились более подробным рассмотрением законов объемного деформирования грунта.

4. Дилатансия. Разрушение структуры сопровождается проявлением дилатансионных свойств грунта [8]. В предлагаемой модели грунтовой среды дилатансию рекомендуется учитывать следующим образом.

Следуя известному в механике грунтов предположению, объемную деформацию грунта считаем состоящей из двух частей:

$$\theta = \theta_p + \theta_s \quad (4.1)$$

где θ – полная объемная деформация, θ_p – объемная деформация соответствующая действию шаровой части тензора напряжений, θ_s – объемная деформация, соответствующая действию девиатора тензора напряжения.

Значение θ_p определяется согласно законам объемного деформирования грунта, предложенным выше. Составляющая объемной деформации, возникающая в результате сдвиговых деформаций, определяется из соотношения [8]

$$\theta_s = \lambda_D \epsilon \quad (4.2)$$

где λ_D – коэффициент дилатансии, ϵ – деформация сдвига.

Для определения коэффициента дилатансии предлагается выражение

$$\lambda_D = (1 - I_s)(\dot{\epsilon} / \mu_s)^\omega, \quad I_s = \epsilon / \epsilon_*, \quad \dot{\epsilon} = d\epsilon / dt \quad (4.3)$$

где ϵ_* – предельное значение деформации сдвига, при котором происходит полное структурное разрушение грунта при чистом сдвиге, μ_s – параметр сдвиговой вязкости грунта, ω – безразмерный показатель степени.

Значения ϵ_* , μ_s и ω определяются экспериментально.

Соотношение (4.2) с учетом (4.3) приводит к выводу об увеличении объема грунта с ростом сдвиговой деформации ϵ . Этот процесс продолжается до значения деформации $\epsilon = \epsilon_*$. Далее согласно (4.2), (4.3) происходит уплотнение грунта, следовательно, его объем уменьшается. Уменьшение объема грунта можно ограничить каким-либо предельным значением сдвиговой деформации $\epsilon = \epsilon_{**}$ и далее считать, что сдвиговая деформация не влияет на изменение объема грунта.

В случаях, когда при сжатии грунта шаровая составляющая превосходит девиаторную часть тензора напряжения, дилатансионными свойствами грунтов можно пренебречь [6, 7].

Таким образом, предлагаемые законы объемного деформирования грунтов уточняют и дополняют уравнение состояния грунтов (1.1), предложенное ранее [1, 2], и приводят к более точному описанию поведения грунтов при учете их основных, в том числе реологических свойств, наблюдаемых в экспериментах.

Диаграммы объемного сжатия грунтов, полученные на основе параметрического анализа предлагаемых законов деформирования, вполне адекватны результатам опытов [4–9], что подтверждает возможность применения этих законов при решении прикладных задач механики грунтов. Предлагаемые нелинейные законы, возможно, применимы также для описания поведения материалов, структура которых изменяется при деформировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С.С. Об общих уравнениях динамики грунтов // Докл. АН СССР. 1959. Т. 124. № 2. С. 285–287.
2. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Т. 24. Вып. 6. С. 1057–1072.
3. Григорян С.С., Иоселевич В.А. Динамика грунтов // Механика в СССР за 50 лет. М.: Наука, 1972. Т. 3. С. 203–226.
4. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 192 с.
5. Ляхов Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982. 286 с.
6. Вовк А.А., Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984. 287 с.
7. Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990. 212 с.
8. Определяющие законы механики грунтов / Под ред. А.Ю. Ишлинского, Г.Г. Черного. М.: Мир, 1975. 230 с.
9. Рыков Г.В., Скобеев А.М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. М.: Наука, 1978. 168 с.
10. Султанов К.С. Математическая модель взаимодействия твердых тел с грунтом при их относительном сдвиге // ПМТФ. 1993. № 1. С. 40–48.
11. Султанов К.С. Закономерности взаимодействия подземных сооружений с грунтом при их относительном сдвиге // Прикл. механика. 1993. Т. 29. № 3. С. 60–67.

Ташкент

Поступила в редакцию
4.XI.1996