

ЭФФЕКТ ЗАМКНУТЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ПРОБЛЕМА ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Ключ к пониманию процессов, вызывающих опасные внезапные выбросы в шахтах, был найден более 30 лет тому назад. Об этом свидетельствует скупая официальная информация протокола №18 Ученого совета института геотехнической механики АН УССР от 16 декабря 1977 года (г. Днепропетровск), копия которого представлена на следующей странице. К сожалению, решениям Ученого совета не суждено было осуществиться, и о выполненной работе вскоре, вероятно, забыли. Для такого забвения были весомые причины, о которых, ввиду тридцатилетнего срока давности, можно без особой надобности пока не вспоминать. Однако трагические события на шахте имени Засядько и сообщения теленовостей о том, что украинская наука объявила о своей несостоятельности объяснить причину возникновения внезапных выбросов, вынудили автора этих строк представить экспертам и специалистам горной механики наряду с упомянутым протоколом Ученого совета также и некоторые публикации тех времен. Автор надеется, что молодое поколение специалистов горной механики прислушается к выводам своих предшественников, большинства из которых уже нет в живых, и постарается разобраться в сущности идеи, которая укажет им правильный путь в преодолении кажущейся неразрешимой проблемы. Однако чтобы быстрее разобраться в сущности идеи, охватывающей необычайно широкий круг проблем, необходимо сначала познакомиться с материалами ссылки <http://a-kozachok1.narod.ru/EZV11.doc>, а затем прочитать прилагаемые после протокола публикации, которые постепенно будут загружаться на сайт. Для более глубокого изучения вопроса следует ознакомиться с завершающим отчетом (т.2) по упомянутой в протоколе теме, который, вероятно, сохранился в архиве института геотехнической механики НАНУ.

копия

«УТВЕРЖДАЕТСЯ»

академик-секретарь Отделения

АН УССР

(подпись)

« _____ » _____ 196 г.

(Наименование учреждения АН УССР Институт геотехнической механики)

ПРОТОКОЛ № 18

35

приемки результатов завершенной научно-исследовательской работы по теме:

Разработка системы управления для автоматизированного межколхозного

(шифр и полное наименование темы)

комбикормового завода (40-50 тонн в сутки)

г. Днепропетровск

16

декабря

1977 г.

1. Присутствовали:

а) члены Ученого совета: член-корр. АН УССР Потураев В.Н., к.т.н. Полуянский С.А.
к.т.н. Манойло А.Я., член-корр. АН УССР Абрамов Ф.А., д.т.н. Ефремов Э.И.,
д.т.н. Забигайло В.В., д.т.н. Зорин А.Н., академик АН УССР Малахов Г.М.,
д.т.н. Москалев А.Н., д.т.н. Новиков Е.Е., академик АН УССР Поляков Н.С.,
д.т.н. Тартаковский Б.Н., Шуляк И.А., Бурлака А.В.

б) исполнители работы: ст.н.сотр. канд. техн. наук Козачок А.А., ст. инж.
Оверчук В.Д., мл.н.сотр. Барган Э.С., мл.н.сотр. Нурибеков И.А-Г.

в) представители заказчика:

г) рецензенты, эксперты: зав. отделом д.т.н. Новиков Е.Е., зав.
отделом д.т.н. Зорин А.Н.

д) приглашенные представители других заинтересованных организаций:

2. Основные данные о рассматриваемой работе (реферат работы прилагается):

а) Цели и задачи исследования: Синтез механизмов целевого назначения,
удовлетворяющих требованиям автоматического управления. Разработка
основ теории деформируемой сыпучей среды

б) Методика и характер исследования: теоретические исследования

в) срок окончания работы по плану IV кв. 1976 г.

г) срок фактического окончания работы IV кв. 1976 г.

д) фактическая продолжительность проведения исследований 4 года 6 мес.

е) плановые затраты на проведение исследований 104,9 в т.ч. по г/б 54,9 т руб.

ж) фактические затраты: 92,6 в т.ч. 59,9 тыс. руб.

з) краткая сущность полученных результатов Выполнен кинематический и структур-
ный анализ привода сушильных барабанов, цепных и ленточных транспорттеров
Получена математическая модель динамических процессов. Предложены улуч-
шенные варианты кинематических схем. Выполнен анализ динамических процес-
сов в измельчающих установках.

Дано математическое описание процесса прессования в грануляторе
роликового типа применительно к реологической модели высоковязкой
сильносжимаемой среды.

Разработаны основы структурно-континуальной механики деформируемых
сред. Рассмотрены элементы механики насыщенных пористых сред. Дан ана-
лиз эффекта замкнутых взаимодействий в насыщенной пористой среде и пред-
ложена механическая модель среды. Показано, что на основе модели можно
дать физическое истолкование процессам, происходящим при внезапных выб-
росах горных пород, а также явлениям микроразрушения. Разработаны элемен-
ты моментной теории деформируемых сред с зернистой структурой.

3. Основные данные об исполнителях:

а) точное наименование и юридические адреса организаций — исполнителей и соисполнителей
(первым указывается головной или ведущий исполнитель). Институт геотехнической
механики АН УССР, 320095, г.Днепропетровск, ул.Симферопольская, 2-а

б) Доля участия (объем работ) соисполнителей в проведении исследования: _____

в) фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, звание руководителя работы: _____
Кожевников Сергей Николаевич, зав.отделом,член-корр. АН УССР,д.т.н.
профессор, заслуженный деятель науки УССР

г) фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень и звание непосредственных исполнителей: _____
ст.н.сотр.,к.т.н. Козачок А.А. мл.н.сотр. Барган Э.Ф.,
ст.инженер Оверчук В.Д., мл.н.сотр.Нурибеков И.А-Г.

4. Наименование и юридические адреса заказчиков работы: _____

5. Дата сдачи работы заказчику (документы о сдаче работы прилагаются) _____

6. Данные о проведенных рецензиях и экспертизах:

а) наименование рецензирующих организаций, фамилии рецензентов и экспертов, их ученые степени и научные звания: ВНИИМОЖ – Погребняк А.П., канд.техн.наук,
ИГТМ АН УССР – д.т.н. Новиков Е.Е., д.т.н. Зорин А.Н.

б) краткая суть заключения рецензентов и экспертов 1. В отчете содержатся расчетные схемы и параметры динамических систем и проведено решение ряда задач, в результате чего сделаны полезные для практики выводы. 2. В работе детально, на правильной методологической основе сделана попытка построения основ структурно-континуальной механики зернистой среды. Построенная теория отличается завершенностью разработок. Все выкладки выполнены в корректной постановке. 3. Результаты теории можно использовать: для пневмо-закладки, гидрозакладки, при рассмотрении деформирования песчаников и объяснения критерия выбросоопасности, при объяснениях механизма деформирования препарированного угля; для совершенствования методики инженерных расчетов технологического оборудования для обработки материалов давлением.

1. Научно-исследовательскую работу по теме: управления для автоматизированного межколхозного комбикормового завода (40-50 тонн в сутки)

считать законченной.

Если в результате рассмотрения отчета будет установлено, что научно-исследовательская работа является незаконченной или содержит ошибочные выводы и необоснованные рекомендации, то в постановляющей части протокола формулируется соответствующее мотивированное решение Ученого Совета с указанием сроков и мер по завершению работы, исправлению ошибок и т. д.

2. Предложения о дальнейшем использовании результатов работы: (издание, применение в смежных исследованиях, внедрение в производство и т. д.)

Г. Оформить результаты работы в виде рекомендаций и передать для внедрения заинтересованным организациям (ин-ты ВНИИЖИВМАШ, ВНИИМОЖ и др.).

2. Продолжить работу применительно к проблеме внезапных выбросов с учетом неоднородного состава горных пород.

3. Заслушать работу на расширенном семинаре "Проблемы выбросов породы и газа" с привлечением заинтересованных организаций и наметить конкретные мероприятия по практическому использованию полученных результатов.

4. Рекомендовать исполнителям подготовить к изданию монографию "Основы структурно-континуальной механики деформируемых сред".

а) место внедрения Институт ВНИИЖИВМАШ, ВНИИМОЖ, ИГТМ

б) объем внедрения рекомендации по совершенствованию оборудования для комбикормовых заводов, постановка прикладных задач горной механики

в) сроки внедрения 1978-1979 г.

3. Ожидаемая экономическая эффективность (расчет, предлагается) Работа посвящена анализу качественных показателей оборудования и разработке основ механики деформируемых зернистых сред

Без Приложения: 1. Реферат работы на 2 лист.

2. Документы о сдаче работы:

а) Акт сдачи от _____ за № _____ на _____ лист.

б) _____

в) _____

3. Справка о плановых и фактических затратах по основным статьям расходов на I лист.

4. Информационная карточка

5. Рецензии и заключения экспертов на 10 лист.

6. Расчет экономической эффективности на _____ лист.

Печать

Подписи:

Председатель Ученого совета

Ученый секретарь совета

Верно
вг/4, 16.XI



серия 01 мк РН ЧССР
Л. Шашило /*А. Ч. Шашило*/

ІНСТИТУТ



ІНСТИТУТ

ГЕОТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ

ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

320600, Дніпропетровськ-95,
вул. Сімферопольська, 2а
Дніпропетровськ, «Геотехник». Тел. 46-01-51

320600, Днепропетровск-95,
ул. Симферопольская, 2а
Днепропетровск, «Геотехник». Тел. 46-01-51

29 декабря 77г. № 3II-22/II-1-3372

на № _____

ГЛАВНОМУ РЕДАКТОРУ ИЗДАТЕЛЬСТВА
"ТЕХНИКА"

Согласно Постановления ЦК КПУ и СМ УССР от 8 мая 1973 года № 224 Институт геотехнической механики АН УССР было поручено выполнить научно-исследовательские работы по сельскохозяйственной тематике и в частности, применительно к теоретическим проблемам обезвоживания свежесобранных растений механическим способом (обработка давлением).

Эти работы проводились на протяжении 1973-1977 гг. по координационному плану, утвержденному Южным отделением ВАСХНИЛ.

Их результаты достаточно подробно и в подходящей для широкого круга читателей форме изложены в подготовленной ст. научным сотрудником института А.А.Казачком монографии "Основы структурно-континуальной механики деформируемых сред".

По оценкам специалистов результаты исследований обладают достаточно широким диапазоном их применимости и, в частности, рекомендованы Ученым советом института для применения в горном деле.

Издание такой монографии окажется полезным в первую очередь для научных работников, специализирующихся в областях обработки давлением материалов с зернистой структурой. механики грунтов, механики горных пород и др.

В этой связи просим включить в план изданий монографию А.А.Казачка "Основы структурно-континуальной механики деформируемых сред", в которой основную ее часть составляют результаты исследований, выполненных лично автором в Институте геотехнической механики АН УССР.

Директор института
член-корреспондент АН УССР В.Н.ПОТУРАЕВ

ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАНИКИ НАСЫЩЕННЫХ ЖИДКОСТЬЮ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД С НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ ЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ. СООБЩЕНИЕ 1

Рассмотрим l -фазную среду, состоящую из неодинаковых по размерам и механическим свойствам твердых частиц l — 1 типов (фаз), промежутки между которыми (поры) заполнены слабовязкой жидкостью (фаза l), а сами частицы взаимодействуют между собой посредством скользящих или типа спайки точечных контактов (связей).

Допустим, мысленно выделенный макрообъем среды $\Delta V = \Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3$ содержит достаточно много частиц каждой фазы (является представительным), и в результате сравнения размеров ΔV и всего деформируемого объема V первый оказывается бесконечно малой (б. м.) величиной или по крайней мере $\Delta V/V \ll 1$. Тогда все макровеличины с символом Δ могут рассматриваться как дифференциалы d , а кинематические и силовые поля, характеризующие взаимодействия частиц, — как непрерывные функции макрокоординат x_i ($i = 1, 2, 3$). При такой идеализации, общепринятой в механике сплошных сред, многофазную и по существу

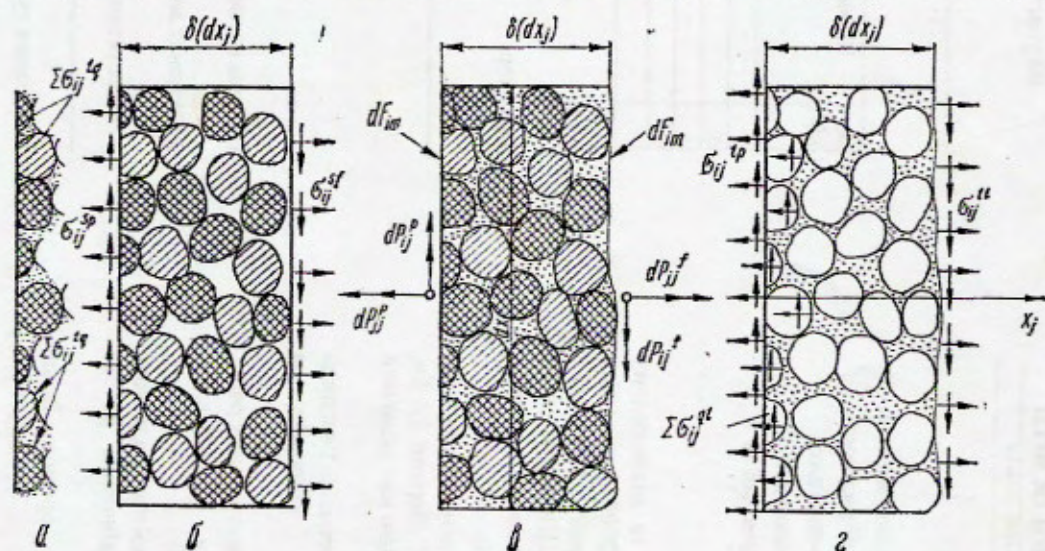


Рис. 1. К определению взаимосвязи между полями напряжений в насыщенной пористой среде:

а — физический смысл напряжений взаимодействия частиц и жидкости; б — к выводу зависимости между полями напряжений твердой фазы; в — к выяснению смысла физической неоднозначности тензора напряжений; г — к выводу зависимости между полями напряжений жидкой фазы.

дискретную среду можно рассматривать как сплошную и строить теорию с позиций механики взаимопроникающих континуумов.

Предположим, ощутимые относительные движения макрообъемов твердых фаз не имеют места, т. е. все частицы из-за плотной упаковки постоянно занимают один и тот же индивидуальный объем. Относительное движение жидкости (фильтрация) не ограничиваем, принимая во внимание лишь отсутствие химических реакций и фазовых переходов при движении. В дальнейшем, однако, будем учитывать, что в пределах объема могут происходить небольшие относительные смещения частиц (переупаковка) за счет скольжения в точках контакта или изменения

размеров связей при спайке частиц, а также за счет различной деформируемости частиц.

Взаимодействия в многофазной среде условно разделим на поверхностные и объемные и, согласно принятых допущений, будем рассматривать их как непрерывные силовые поля. С помощью поверхностных полей охарактеризуем взаимодействие между частицами одной и той же фазы P^{qq} и различных фаз P^{qr} , а также напряженное состояние внутри частиц и в жидкости P^{qp} . Относя указанные силовые поля к макроплощадке dF_{im} , введем соответствующие им поля макронапряжений σ_{ij}^{qq} , σ_{ij}^{qr} , σ_{ij}^{qp} (напряжений).

Если учесть, что напряженное состояние внутри частиц, образующих площадки dF_{im} , полностью определяется приложенными к ним силами, т. е. P^{qq} , P^{qr} , несложно получить взаимосвязи между внутренними полями P^{qp} и полями P^{qq} , P^{qr} , которые в данном случае оказываются внешними по отношению к P^{qp} . Для этого достаточно из элементарного объема dV мысленно выделить слой, толщина которого является б. м. величиной второго порядка $\delta(dx_j)$, и одна из площадок dF_{im} разделяет частицы по телу, а вторая — по контактам (рис. 1). Исключая из слоя все фазы, кроме одной, и пренебрегая объемными силами, которые являются бесконечно малыми более высокого порядка, чем поверхностные, получим условия равновесия слоя твердой фазы q и жидкой фазы l :

$$\sigma_{ij}^{qp} = \sigma_{ij}^{qq} + \sum_{r=1}^l \sigma_{ij}^{qr}; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^{ll} = \sigma_{ij}^{lp} + \sum_{r=1}^{l-1} \sigma_{ij}^{lr}, \quad (r \neq q). \quad (2)$$

Как следует из рис. 1 и уравнений (1), (2), поля напряжений, характеризующие напряженные состояния фаз, нельзя определить однозначно. В одном случае — это σ_{ij}^{qp} , а в другом — σ_{ij}^{qq} . В реальных условиях может оказаться, что контактные взаимодействия не имеют места, т. е. $\sigma_{ij}^{qr}, \sigma_{ij}^{qq} = 0$ при $\sigma_{ij}^{qp} \neq 0$ (например, разбавленные суспензии частиц).

В случае ощутимых контактных взаимодействий частиц (уплотняемые среды) существенное влияние на напряженное состояние макрообъема будут оказывать лишь нормальные составляющие напряжений жидкой фазы δ_{ij}^{lp} и σ_{ij}^{ll} , но при отсутствии таких взаимодействий касательные составляющие, наряду с нормальными, также становятся определяющими.

Поля напряжений для среды в целом, согласно рис. 1, σ , определяются как результат сложения полей фазовых напряжений

$$\sigma_{ij}^p = \sum_{q=1}^l \sigma_{ij}^{qp}, \quad \sigma_{ij}^f = \sum_{q=1}^l \sigma_{ij}^{qq} + \sum_{q,r=1}^l \sigma_{ij}^{qr}, \quad \sigma_{ij}^p = \sigma_{ij}^f = \sigma_{ij}. \quad (3)$$

При этом следует иметь в виду, что $\sigma_{ij}^{qr} = \sigma_{ij}^{rq}$. Аналогичные соотношения можно записать и для полей напряжений твердой фазы в целом (каркас)

$$\sigma_{ij}^{sp} = \sum_{q=1}^{l-1} \sigma_{ij}^{qp}, \quad \sigma_{ij}^{sf} = \sum_{q=1}^{l-1} \sigma_{ij}^{qq} + \sum_{q,r=1}^{l-1} \sigma_{ij}^{qr}, \quad \sigma_{ij}^{sp} \neq \sigma_{ij}^{sf}. \quad (4)$$

Напряжения для среды в целом σ_{ij}^p и σ_{ij}^f хотя, согласно уравнениям (3), и равны между собой по величине, характеризуют интенсивность различных силовых

полей, и следовательно, при математической однозначности являются физически неоднозначными. Что касается напряжений каркаса σ_{ij}^{sp} , σ_{ij}^{sf} , то эти поля обладают и физической, и математической неоднозначностью.

Необходимо отметить, что, хотя жидкая фаза и не представляет собой отдельных частиц, а целиком заполняет поровое пространство, ее физически однозначное поле напряжений тоже не имеет математически однозначного определения. Так, если контакты частиц считать точечными (т. е. размеры связей малыми), при разделении среды по контактам на долю жидкой фазы приходится почти вся площадь dF_{im} , а при разделении по телу частиц — только ее часть, образуемая сечениями пор. Именно поэтому напряжения σ_{ij}^{lp} не эквивалентны напряжениям σ_{ij}^{ll} , а связаны с ними уравнением (2).

Наряду с поверхностными полями σ_{ij}^{qr} , характеризующими межфазовые взаимодействия при их совместном деформировании, в уравнения движения необходимо вводить объемные силовые поля R_i , которые характеризуют взаимодействия при относительном движении фаз и градиенты различных поверхностных полей.

Рассмотренные выше представления о силовых взаимодействиях дополняет предлагаемая автором механическая модель (рис. 2), в которой роль упругих частиц играет пружина 2 совместно с поршнями 3. При перемещении поршня 4 в жидкости возникает давление p_l , которое в свою очередь воздействует на поршни, сжимающие пружину 2. Усилия в пружинах 1 имитируют силовые взаимодействия частиц, т. е. σ_{ij}^{sf} , а усилия в пружине 2 — напряженное состояние внутри частиц σ_{ij}^{sp} . Давление жидкости p_l , очевидно, будет зависеть от скорости перемещения поршня 4 из-за наличия в нем отверстий.

Пружины 1 и 2 можно заменить вязкими, пластичными или более сложными элементами, которые выбираются интуитивно с учетом возможных свойств вещества частиц и особенностей их взаимодействий. Например, упругие элементы 1 больше соответствуют наличию механических связей, а вязкие — точечным контактам с жидкой смазкой.

При быстром нагружении модели, обеспечивающем малую утечку жидкости через отверстия, перемещение поршней 3 окажется большим, чем поршня 4, что вызовет растяжение пружин 1. Рассматривая баланс сил, действующих на поршень 4, получим, что давление p_l в этом случае больше, чем при том же усилии P , но при отсутствии пружин 1. Заметим, что разность хода поршней 3 и 4 обеспечивается разностью их диаметров, если, разумеется, жидкость слабосжимаемая, а ее утечка через отверстия в поршне 4 мала.

Элементарный подсчет работы, расходуемой на перемещение жидкости при давлении p_l и при ходе h поршня 4 показывает, что ее величина превышает работу, выполняемую за счет усилия P . Таким образом, имеет место эффект замкнутых взаимодействий (ЭЗВ).

В рассматриваемом случае ЭЗВ приводит к тому, что давление жидкости в насыщенной пористой среде может оказаться значительно большим, чем результирующие напряжения, ввиду различия по знаку напряжений связей σ_{ij}^{sf} и жидкости $\sigma_{ij}^{ll} = -p_l$. Становится очевидным, что быстрое нагружение насыщенной среды зернистого строения приводит к сжатию частиц и может вызвать растяжение их связей. Этот вывод свидетельствует о том, что установленная выше

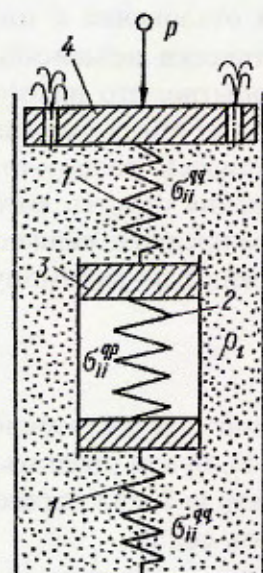


Рис. 2. Простейший вариант линейной модели.

неоднозначность полей напряжений твердой фазы бывает весьма существенной и в количественном отношении. Рассмотренная ситуация может вызвать разрушение связей, особенно в тех случаях, когда пористое тело закреплено по контуру или на него действуют силы растяжения (например центробежные). Случай, когда размеры связей малы, по сравнению с размерами частиц, является наиболее благоприятным для их разрушения, так как при общих перемещениях точек соединения связей и частиц относительные деформации окажутся пропорциональными их абсолютным размерам.

Линейная модель допускает обобщение и в случае пространственного нагружения частиц (рис. 3). Параллельное, последовательное или комбинированное

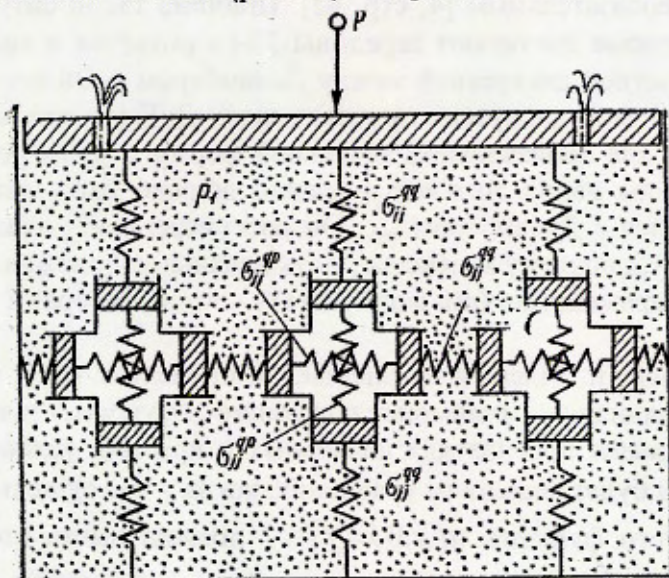


Рис. 3. Вариант пространственной модели.

соединения таких моделей позволяют более корректно описать поведение реальных материалов. Но даже простейшая модель, согласно рис. 2, позволяет дать объяснение целому ряду наблюдаемых на практике эффектов, физическая сущность которых оставалась не выясненной.

Можно, по-видимому, утверждать, что явление снижения сопротивления деформированию и падение прочности насыщенных жидкостью пористых материалов (эффект Ребиндера) [4] обязано своим возникновением ЭЗВ. Явление запрессовки (гидравлических ударов) при обезвоживании на прессах с высокими скоростями прессования тоже происходит благодаря ЭЗВ.

Замечено также [4], что кавитационное разрушение металлов в значительной степени зависит от размеров зерен металла и характера связей между ними. Модели, согласно рис. 1—3, учитывают именно это обстоятельство.

Уравнения (1) — (4), по-видимому, являются динамическими соотношениями модели (рис. 3) с различными механическими свойствами элементов, но в противоположность механической модели справедливы для произвольного напряженного состояния среды.

Для построения реологической модели многофазной среды динамические соотношения (1) — (4), как и в теории вязкоупругости, должны быть дополнены соответствующими им кинематическими соотношениями.

Поскольку частицы каждой фазы (за исключением жидкой) в процессе деформации занимают один и тот же макрообъем, сравнивая его начальное dV_0 и конечное dV состояния, можно ввести тензорные характеристики макродеформаций ϵ_{ij}^q (деформаций) и скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}^q$

$$\epsilon_{ij}^q = \epsilon_{ij}, \quad \dot{\epsilon}_{ij}^q = \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (5)$$

которые являются общими для каждой из фаз и для каркаса в целом.

Деформации каркаса определяются вкладами двух различных по природе микропроцессов, а именно: изменением размеров частиц и их относительными смещениями. Если воспользоваться известной из работ [5, 6] идеей о свойстве аддитивности при определении связи между упругими, пластическими и полны-

ми деформациями, в рассматриваемом случае для ε_{ij}^q , ε_{ij}^f получим соотношения

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ij}^q &= \varepsilon_{ij}^{qp} + \varepsilon_{ij}^{qf}; & \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^f; \\ \varepsilon_{ij}^q &= \varepsilon_{ij}^{qp} + \varepsilon_{ij}^{qf}; & \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^f.\end{aligned}\quad (6)$$

Аналогичные соотношения можно записать и для объемных деформаций:

$$\begin{aligned}\varepsilon^q &= \varepsilon^{qp} + \varepsilon^{qf}; & \varepsilon &= \varepsilon^p + \varepsilon^f; \\ \varepsilon^q &= \varepsilon^{qp} + \varepsilon^{qf}; & \varepsilon &= \varepsilon^p + \varepsilon^f.\end{aligned}\quad (7)$$

Взаимосвязи между компонентами тензоров деформаций (скоростей деформаций) и соответствующими им градиентами перемещений (скоростей) общеизвестны и в настоящей статье не приводятся.

Уравнения (5) — (7) представляют собой кинематические соотношения модели, согласно рис. 3, но применимы для произвольного случая напряженно-деформированного состояния среды.

Следует заметить, что кинематические соотношения для жидкой фазы в статье не рассматриваются, поскольку изменение формы макрообъема слабовязкой жидкости не окажет существенного влияния на напряженное состояние среды в целом ввиду плотной упаковки частиц.

Дальнейшее развитие рассмотренных выше построений на основе феноменологических принципов позволяет получить весьма интересные результаты. Так, при отсутствии жидкости в порах можно не усматривать качественного различия между σ_{ij}^{qq} и σ_{ij}^{qr} , а правую часть уравнений (1) обозначить σ_{ij}^{qf} и считать ее тензором напряжений, характеризующим взаимодействия вообще частиц фазы q . Нетрудно заметить, что это условие является динамическим соотношением модели Максвелла [2]. Если частицы подчиняются упругому закону деформирования, а их относительные смещения можно рассматривать как вязкое течение, то, учитывая выражения (5) — (7), приходим к обобщенной модели Максвелла.

Модель Фойхта можно получить, оставив для рассмотрения только две фазы и полагая при этом, что для одной из них и частицы и их взаимодействия подчиняются упругому закону деформирования, а для второй — вязкому. Получение упругих известных и новых моделей таким путем, по-видимому, не представляет принципиальных трудностей.

Учет фильтрации жидкости и различного рода эффектов внутреннего трения частиц открывает возможности построения более сложных моделей, рассчитанных на случаи пространственного нагружения среды.

Если при изучении среды поведение ее фаз нас не интересует, то необходимость в записи уравнений движения каждой фазы отпадает. В этом случае достаточно уравнений для среды в целом. Предварительная детализация взаимодействий все же оказывается полезной для получения динамических и кинематических соотношений и построения реологического уравнения для среды в целом способом, изложенным в работе [2]. Однако построить такое уравнение, которое не содержало бы кинематических параметров отдельных фаз, можно не всегда.

В названных случаях и в случае, когда преследуется цель изучения поведения не только среды в целом, но и ее фаз, необходимо использовать уравнения движения всех фаз, из которых после подстановки определяющих соотношений определяются поля составляющих деформаций каждой фазы.

Уравнения движения в напряжениях для каждой фазы можно получить общеизвестным классическим способом, мысленно выделив элементарный объем dV и поочередно исключая из него $l - 1$ фазы. При этом воздействие исключенных фаз на оставшуюся учитывается удельными силами межфазовых взаимодействий R_l . Поскольку каждая фаза (кроме жидкости) по условию состоит из имеющих

замкнутую форму частиц, выделить элементарный объем можно двумя способами, а именно разрезом по телу частиц или путем разделения их в точках контакта. Тогда в силу неоднозначного определения полей напряжений для q -ой фазы получим системы уравнений

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}^{qq}}{\partial x_j} + F_i^q + R_{i+}^{qr} = 0; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}^{qp}}{\partial x_j} + F_i^q + R_{i-}^{qr} = 0, \quad (i = 1, 2, 3),$$

в которых силы межфазовых взаимодействий также определяются неоднозначно. Сравнивая обе системы и имея в виду уравнения (1), установим взаимосвязь между R_{i+}^{qr} и R_{i-}^{qr} :

$$R_{i-}^{qr} = R_{i+}^{qr} \mp \sum_{r=1}^l \frac{\partial \sigma_{ij}^{qr}}{\partial x_j}, \quad (+ \text{ при } q = l), \quad (9)$$

отражающую тот факт, что R_{i+}^{qr} является результирующей силой, характеризующей взаимодействия на всей поверхности раздела фазы q в элементарном объеме dV . Второй член в выражении (9) характеризует градиент поверхностной силы межфазовых взаимодействий.

Соотношения для R_i имеет смысл формулировать по аналогии с законом Дарси. Что касается величин σ_{ij}^{qr} , то для их определения необходимо привлекать дополнительные соображения, смысл которых лучше всего можно выяснить при переходе к структурной теории.

Привлечение континуальных представлений для рассмотрения многофазных сред с учетом химических реакций и фазовых превращений, но в предположении равенства фазовых давлений, имеет место в работе [1], где также отмечена необходимость введения набора тензоров скоростей деформаций каждой фазы, учитывающих условия их совместного деформирования и структуру среды.

Построение замыкающих соотношений в рассматриваемом случае хотя и значительно облегчено, но еще не может быть реализовано достаточно корректно, поскольку материальные функции, характеризующие упругие и вязкие свойства среды, ее проницаемость для жидкой фазы и т. п. должны зависеть от деформаций, изменяющих начальную структуру и в общем случае вызывающих деформационную анизотропию, упрочнение и другие эффекты.

Впервые определяющее значение напряжений взаимодействия частиц в насыщенных грунтах, получивших название эффективных (фиктивных) напряжений, в результате своих опытов осознал К. Терцаги. Особенное внимание на роль эффективных напряжений в случае слабдеформируемых частиц обращает также В. Н. Николаевский в работе [3]. Однако ни один из авторов не обратил внимание на то, что напряжения взаимодействия σ_{ij}^{sf} и напряжения в частицах σ_{ij}^{sp} могут иметь различные знаки с вытекающими отсюда чрезвычайно важными последствиями. Именно это обстоятельство, обнаруженное благодаря построению механической модели, позволило установить ранее неизвестное в насыщенных пористых средах явление — эффект замкнутых взаимодействий.

Список литературы

1. Дорохов И. Н.; Кафаров В. В.; Нигматулин Р. И. — Теоретические основы химической технологии, 1978, № 2.
2. Ильюшин А. А.; Победра Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М., Наука, 1970.
3. Механика насыщенных пористых сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. М., Недра, 1970.
4. Партон В. З.; Черепанов Г. П. — В кн.: Механика в СССР за 50 лет. М., Наука, 1972.
5. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 2. М., Наука, 1970.
6. Эглит М. Э. — Прикладная математика и механика, 1960, вып. 5.

Поступила в редколлегию 01.12.78.