

УДК 539.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИСТИННО ТРЕХОСНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2019 г. В. И. Карев^{a,*}, Д. М. Климов^a, Ю. Ф. Коваленко^a, К. Б. Устинов^{a,**}

^a *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия*

**e-mail: wikarev@ipmnet.ru*

***e-mail: ustinov@ipmnet.ru*

Поступила в редакцию 28.07.2019 г.

После доработки 01.08.2019 г.

Принята к публикации 30.08.2019 г.

Целью работы является исследование зависимости от времени деформаций при сложных напряженных состояниях, возникающих в пласте при разработке месторождений нефти и газа. Эксперименты проводились на Испытательной системе трехосного независимого нагружения ИПМех РАН на породах нефтяного месторождения Приразломной по программам нагружения, моделирующим напряженное состояние в прискважинной области при уменьшении давления в скважине. Представлены экспериментальные зависимости деформаций от времени при ступенчатом нагружении. Обсуждаются основные требования к построению модели напряженно-деформированного состояния, учитывающей влияние временных эффектов.

Ключевые слова: горные породы, неупругая деформация, ползучесть, истинно трехосные испытания

DOI: 10.1134/S0572329919060084

1. Введение. Прочностные характеристики материалов существенно зависят от характерных времен нахождения под нагрузкой – с их увеличением прочность уменьшается. Данное свойство обуславливается процессами разупрочнения, развивающимися во времени. Эти же или другие процессы приводят к развитию во времени необратимых деформаций, называемых обычно деформациями ползучести.

Учет явления ползучести горных пород имеет большое значение при прогнозировании долговременной прочности скважин, особенно в случае необсаженного ствола. Если горная порода в окрестности необсаженной скважины способна деформироваться при постоянном давлении на забое скважины, то постепенно порода будет выдавливаться внутрь скважины, что в итоге может привести к разрушению скважины.

Для описания деформирования, развивающегося во времени, существует множество моделей: наследственной упругости, собственно теории ползучести, основными разновидностями которой являются теории старения, течения и упрочнения [1–4]. Достаточно полные обзоры представлены в [1–6]. Среди монографий, посвященных исследованию ползучести горных пород, следует отметить [7, 8]. Однако для описания деформирования ползучести совместно с пластическим деформированием в условиях сложного трехмерного изменяющегося напряженного состояния не все модели представляются пригодными; в первую очередь это относится к моделям типа Максвелла, Фойхта и др., получаемых комбинированием стандартных упругих и вязких элементов. Многие теории ползучести построены по аналогии с теорией пластичности, ис-

пользуемые в них функции (пластический потенциал, модуль пластичности) становятся явно или неявно зависящими от времени [2, 3]. Именно такие теории наиболее пригодны для поставленных целей. К сожалению, все без исключения теории ползучести построены на основе умозрительных заключений, имеют формальный характер и содержат большое число параметров или материальных функций, подлежащих определению. Как отмечалось в [2], ввиду отсутствия необходимого количества экспериментальных данных отсутствует возможность отдать предпочтение одной из них. К горным породам это относится еще в большей степени. В этой связи для описания ползучести пород следует отдавать предпочтение максимально простым моделям с минимальным набором параметров.

Экспериментальному изучению зависимости деформирования горных пород от времени с целью построения (или выбора из имеющихся) модели упруго-вязко-пластического деформирования и посвящена настоящая работа.

Поскольку влияние неравнокомпонентности напряженного состояния на процессы ползучести изучены еще недостаточно, особенно для горных пород, предполагается исследовать напряженные состояния, максимально приближенные к состояниям, возникающим в пласте при разработке нефтегазовых месторождений.

В работе дано описание постановки эксперимента, используемого оборудования, полученных экспериментальных данных, обсуждение основных требований построению модели напряженно-деформированного состояния, учитывающей влияние временных эффектов (ползучести).

2. Постановка эксперимента. Для проведения опытов использовалась Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН), созданная в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. Система позволяет испытывать образцы кубической формы при нагружении независимо по каждой из трех осей при управлении как по приложенным силам, так и по перемещениям [9–15]. Испытания проводились на образцах породы с ребром 40 мм.

Программы испытаний (рис. 1) строились с целью моделирования напряженного состояния, возникающего вблизи горизонтальной скважины в проницаемом пласте с неравнокомпонентным исходным напряженным состоянием, когда главные эффективные (действующие на грунтовый скелет [16–18]) напряжения равны $s_1 = s_2 = \lambda s_3$. Здесь $s_3 = \gamma h - p$ – вертикальное эффективное напряжение; γ – плотность вышележащих пород; h – глубина; p – начальное пластовое давление; $\lambda < 1$ – коэффициент бокового распора. Скважина пробурена в направлении действия напряжения s_2 .

На первом этапе (сегмент ОА на рис. 1) образец обжимается по оси 3 напряжением, соответствующим напряжению $s_3 = \gamma h - p$, а по осям 1 и 2 – напряжениями $s_1 = s_2 = \lambda s_3$. Точка А соответствует напряжениям, действовавшим в грунтовом скелете до пробуривания скважины.

На втором этапе нагружения (сегмент АВ) одна компонента напряжения (s_1) убывает, вторая (s_2) остается постоянной, а третья (s_3) продолжает расти. Каждая точка на участке АВ соответствует определенному давлению на забое скважины, большему, чем пластовое, т.е. определенной величине репрессии. Конечная точка этапа (точка В, где $s_3 = (3 - \lambda)(\gamma h - p)$, $s_1 = 0$) отвечает состоянию на контуре скважины в наиболее нагруженной точке (находящейся на горизонтальной оси точке М рис. 2), когда скважина пробурена и давление на забое равно пластовому [15]. Таким образом, s_1 , s_2 , s_3 соответствуют радиальным, продольным и окружным эффективным напряжениям на контуре скважины.

Замечание. Для условия плоской деформации, наиболее близко соответствующего состоянию скважины, для $\lambda \neq 1$ напряжение s_2 не остается постоянным, и для точки В становится $s_2 = [\lambda + 2\nu(1 - \lambda)]s_3$, где ν – коэффициент Пуассона. Однако в целях упро-

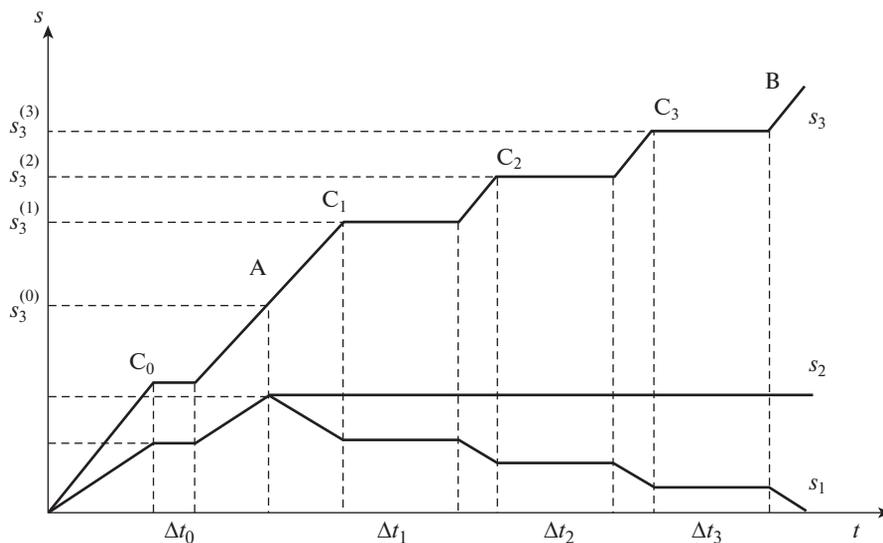


Рис. 1

$$\begin{array}{c} \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \end{array} \quad s_3 = \gamma h - p$$

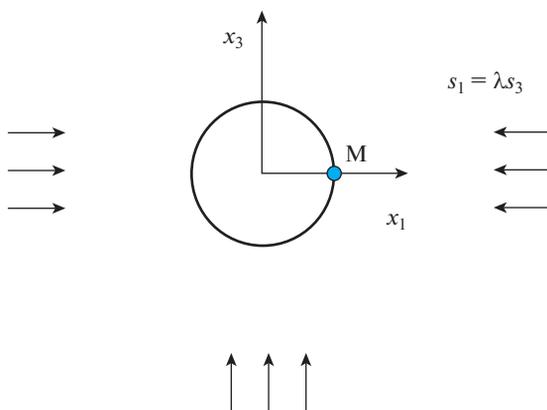


Рис. 2

щения моделирования, ввиду малости вносимой поправки, а также предполагаемой малости влияния среднего главного напряжения на деформирование, его величина поддерживалась постоянной.

Все испытания проводились в режиме контроля напряжений. На участках изменения напряжений скорость роста (уменьшения) напряжения s_3 составляла 0.03 МПа/с.

Для измерения собственно деформаций ползучести при достижении некоторых уровней напряжения $s_3 = s_3^{(k)}$, $k = 1, 2, 3 \dots$ и соответствующих им напряжений $s_1 = s_1^{(k)}$

Таблица 1

Обр.	h	λ	s_0	$s_3^{(0)}$	$s_3^{(1)}$	$s_1^{(1)}$	$s_3^{(2)}$	$s_1^{(2)}$	$s_3^{(3)}$	$s_1^{(3)}$	$s_3^{(4)}$	$s_1^{(4)}$	$s_3^{(5)}$	$s_1^{(5)}$
П1	2515	1	33		56.2	9.8	57.6	8.4	59.5	6.5				
П2	2515	0.4	13.2		52.4	8.7	55.9	7.8	57.9	7.4				
П3	2517	0.4	13.2	18	50.6	9.1	53.3	8.4	55.5	7.9	57.8	7.3	59.9	6.9
П4	2549	0.4	11		51.5	5.3	53.2	4.9	53.7	4.8				

Таблица 2

Образец	Глубина отбора керна, м	Модуль сцепления, МПа	Угол внутреннего трения, град	Цикл 1 2 МПа		Цикл 2 10 МПа		Цикл 3 20 МПа	
				$E, 10^{-3}$ МПа	ν	$E, 10^{-3}$ МПа	ν	$E, 10^{-3}$ МПа	ν
П-5	2548.5	16	24	15.6	0.23	17.7	0.15	17.8	0.12
П-6	2514.75	10	30	9.4	0.40	10.8	0.29	13.1	0.23
П-7	2517	14	26	11.2	0.26	13.8	0.18	14.0	0.22

нагружение останавливалось и образцы выдерживались под постоянной нагрузкой некоторое время Δt_k (рис. 1). Для некоторых образцов нагружение останавливалось также на первом участке (ОА).

3. Результаты испытаний. Были проведены испытания четырех образцов из коллектора Приразломного месторождения. Напряжения, при которых образцы выдерживались при постоянной нагрузке, приведены в табл. 1 (s_0 – напряжение в точке C_0 , рис. 1).

Зависимости деформаций от времени и зависимости деформации от напряжения приведены на рис. 3 и 4 для образцов П-1, П-2, П-3, П-4. На рис. 3 по оси абсцисс время измеряется в секундах, на рис. 4 по оси ординат напряжение измеряется в МПа.

В ходе испытаний пород коллектора месторождения Приразломное были определены также их механические свойства. Для определения упругих и прочностных свойств на образцах П-5, П-6, П-7, вырезанных из пород разных литотипов, был проделан ряд опытов (по три на каждый тип породы), состоящих из трех циклов нагружения. В ходе каждого цикла образец первоначально равномерно обжимался по всем трем осям до напряжений 2, 10, 20 МПа, соответственно, после чего по оси, совпадающей с осью керна, напряжение продолжало увеличиваться, а два других напряжения сохранялись постоянными. Нагружение образца на этой стадии осуществлялось при управлении по перемещению при постоянной скорости деформации образца $8 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Каждый цикл прекращался при переходе образца в предельное состояние, т.е. когда с увеличением деформации напряжение по оси нагружения падало до 30–40% от достигнутого на данном цикле. В ходе опыта измерялась деформация образца по трем осям. В диапазоне упругих деформаций определялись модули Юнга и коэффициенты Пуассона пород. Таким образом реализованная программа испытаний образцов позволила получить три предельных состояния при различных напряжениях всестороннего обжатия и вычислить прочностные характеристики породы – модуль сцепления и угол внутреннего трения. Испытанные породы оказались изотропными по упругим и прочностным свойствам. В табл. 2 приведены модули Юнга, коэффициенты Пуассона, а также прочностные характеристики пород.

Согласно данным испытаний для пород исследуемого месторождения можно выделить два режима ползучести: ограниченная (затухающая) ползучесть, проявляющаяся

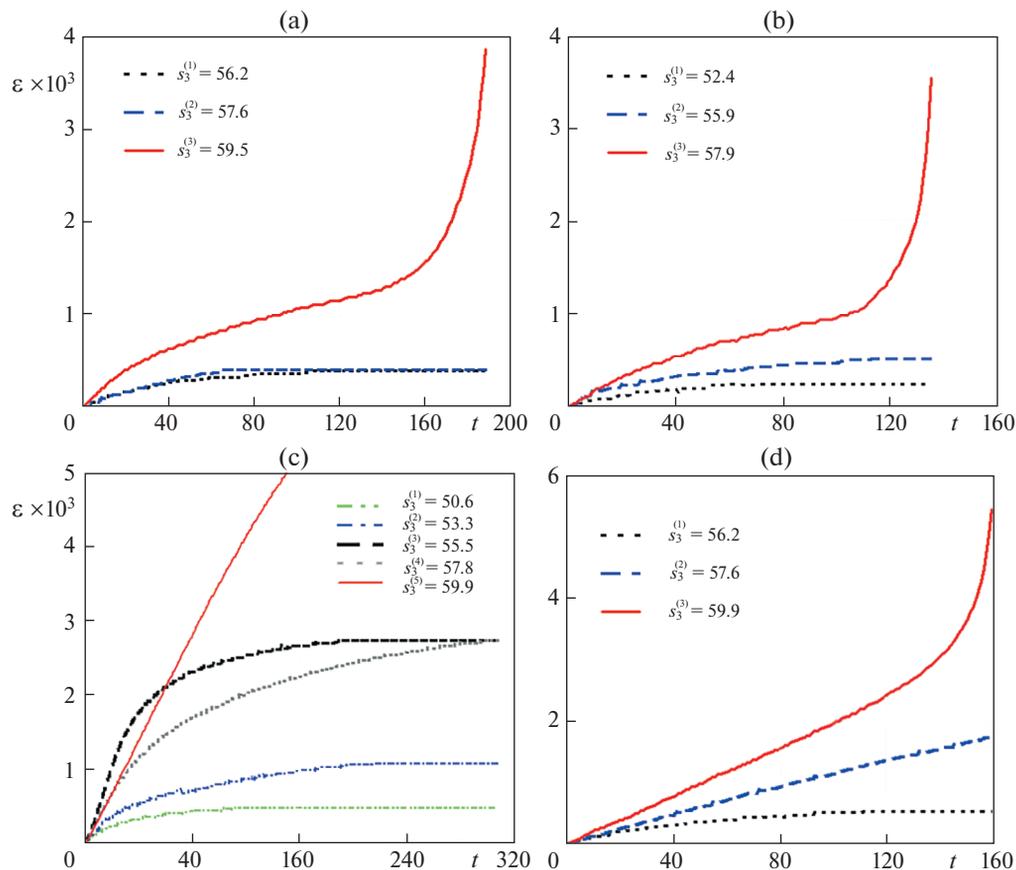


Рис. 3

при интенсивности напряжений ниже критического значения, и неограниченная (незатухающая) ползучесть, проявляющаяся при напряжениях выше критического значения. Обращает на себя внимание тот факт, что, по крайней мере для исследуемого диапазона времен, переход от ограниченной к неограниченной ползучести соответствует достаточно узкому интервалу изменения напряжений.

Безусловно, проведенные испытания (порядка минут или десятков минут) соответствуют режиму краткосрочной ползучести. При уровнях напряжений, предшествующих наблюдаемому в экспериментах переходу к неограниченной ползучести, можно ожидать подобного перехода при более длительных временах. Изучение данного явления является предметом дальнейших исследований.

Для некоторых образцов опыты показали снижение скорости накопления неупругих деформаций с ростом напряжения. Данное явление можно объяснить в терминах распространенных теорий ползучести, таких как теория упрочнения [2, 4], согласно которой процесс дальнейшего развития деформаций ползучести определяется не только уровнем напряжений, но и величиной накопленных неупругих деформаций, либо полных, либо связанных только непосредственно с ползучестью, т.е. за исключением мгновенно возникающих пластических деформаций [2]. Так, очевидно, в режиме затухающих деформаций после достаточно долгой выдержки образца под действи-

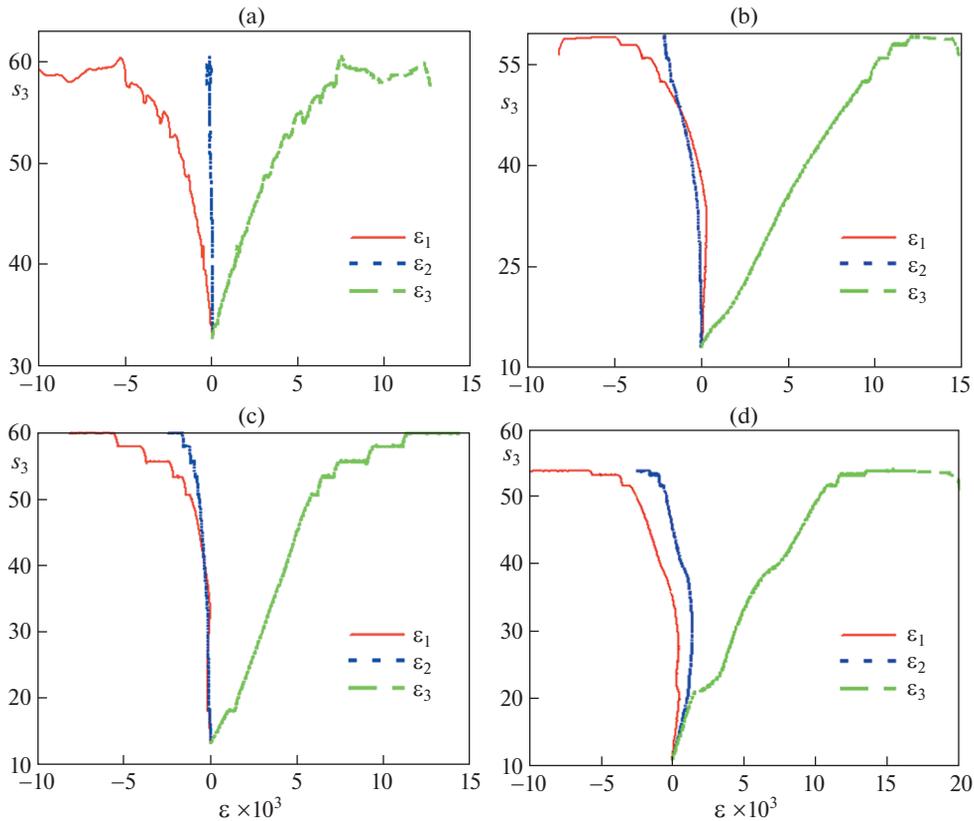


Рис. 4

ем некоторого уровня напряжений, после небольшого увеличения прикладываемых напряжений едва ли можно ожидать существенного роста деформаций ползучести. Согласно традиционному методу предсказания роста деформаций ползучести в терминах теории упрочнения, при приложении напряжений определенного уровня дальнейшее деформирование следует определять, начиная от точки, соответствующей уровню уже накопленных деформаций ползучести [2]. Таким образом, при скачкообразном увеличении напряжений рост деформаций ползучести, согласно теории упрочнения, будет тем меньше, чем меньше относительная величина скачка и чем длительнее была выдержка на предыдущих этапах.

4. Обсуждение результатов. Одной из целей проведенных экспериментов было получение данных, на основе которых можно было бы построить модель зависящего от времени деформирования горных пород в процессе проведения горно-технологических операций и инкорпорирование данной модели в модель неупругого деформирования [9–15].

Основными задачами моделирования ползучести горных пород представляются следующие:

- выбор базовой модели ползучести из традиционно используемых (теории наследственности, старения, течения, упрочнения, пластической наследственности, кинетической теории и др.) [1–4];

– выбор обобщения модели однопараметрического нагружения для описания изменения трехосного напряженного состояния; выбор типа потенциала ползучести, аналогичного пластическому потенциалу, посредством которого определяются деформации ползучести [2–4];

– обобщение принимаемых моделей для учета таких специфических для горных пород феноменов как (а) влияние первого инварианта напряжений на неупругое деформирование [19, 20] и (б) отсутствие прямой связи неупругой объемной деформации (или ее приращения) с величиной первого инварианта напряжений [21–23, 20];

– выбор типа вклада зависящих и независящих от времени неупругих деформаций в величины определяющие их дальнейшее развитие [2];

– обобщение модели для учета анизотропии деформационных и прочностных свойств пород, подобно моделям пластичности [24–27].

Выбор по каждому из перечисленных пунктов должен обуславливаться критериями наиболее адекватного описания наблюдаемых явлений для интересующих типов напряженного состояния.

Заключение. Исследованы зависимости от времени деформаций при сложных напряженных состояниях, возникающих в пласте при разработке месторождений нефти и газа. Получены данные, на основе которых можно построить модель зависящего от времени деформирования горных пород в процессе проведения горно-технологических операций и инкорпорирование данной модели в модель неупругого деформирования. Представлены экспериментальные зависимости деформаций от времени при ступенчатом нагружении. Обсуждены основные требования к построению модели напряженно-деформированного состояния, учитывающей влияние временных эффектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 16-11-10325-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов Л.М. Теория ползучести. М.: Физматлит, 1960. 455 с.
2. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
4. Симонян А.М. Некоторые вопросы ползучести. Ереван: Гитутюн, 1999. 260 с.
5. Nadai A. Theory of Flow and Fracture of Solids. New York: McGraw-Hill Book Co, 1950. V. 1. 1277 p.
6. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of rock mechanics. Malden, Mass.; Oxford: Blackwell, 2007. 475 p.
7. Cristescu N. Rock Rheology. Kluwer Academic Pub., 1989. 336 p.
8. Cristescu N.D., Hunsche U. Time Effects in Rock Mechanics. Wiley, 1998. 342 p.
9. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Моделирование деформирования и разрушения анизотропных пород вблизи горизонтальной скважины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 3. С. 12-21. <https://doi.org/10.1134/S1062739117032319>
10. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Степанова Е.В., Устинов К.Б. Моделирование фильтрации флюида в скважину на больших глубинах с учетом анизотропии прочностных свойств пород коллектора // Процессы в геосредах. 2017. № 2 (11). С. 512–521.
11. Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu F., Ustinov K.B. Modelling of mechanical and filtration processes near the well with regard to anisotropy // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 991. P. 012039 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/991/1/012039>
12. Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu F. Modeling Geomechanical Processes in Oil and Gas Reservoirs at the True Triaxial Loading Apparatus // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Ser. Springer Geology. 2018. V. 30. P. 336–349. DOI 10.1007%2F978-3-319-77788-7_35

13. *Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B.* Modeling of Deformation and Filtration Processes Near Wells with Emphasis of their Coupling and Effects Caused by Anisotropy // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Ser. Springer Geology. 2018. V. 30. P. 350–360. DOI 10.1007%2F978-3-319-77788-7_36
14. *Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu F., Ustinov K.B.* Modeling of deformation and filtration processes near producing wells: Influence of stress state and anisotropy // Proc. Symp. “EUROCK2018. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses”. Litvinenko (ed.). London: Taylor & Francis Group, 2018. V. 2. P. 1381–1386.
15. *Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б.* Моделирование геомеханических процессов в окрестности нефтяных и газовых скважин. М.: ИПМех РАН, 2018. 528 с.
16. *Biot M.A.* Le problème de la consolidation des matières argileuses sous une charge // Ann. Soc. Sc. de Brux. 1935. Ser. B. V. 55. P. 110–113.
17. *Biot M.A.* General theory of three-dimensional consolidation // J. of Appl. Phys. 1941. V. 12. P. 155–165.
18. *Желтов Ю.П., Христианович С.А.* О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. 1955. № 5. С. 3–41.
19. *Drucker D.C., Prager W.* Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quart. of Appl. Math. 1952. V. 10. № 2. P. 157–165.
20. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 448 с.
21. *Reynolds O.* On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations // Philosophica Magazine. 1885. Ser. 5. № 20 (127). P. 469–481.
22. *Mead W.J.* The geologic role of dilatancy // J. Geol. 1925. V. 33. № 5. P. 685–698.
23. *Николаевский В.Н.* О связи объемных и сдвиговых пластических деформаций и ударных волн в мягких грунтах // Докл. АН СССР. 1967. Т. 177. № 3. С. 542–545.
24. *Hill R.* A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals // Proc. Roy. Soc. London A. 1948. 193. P. 281–297.
25. *Hill R.* The Mathematical Theory of Plasticity. New York: Oxford University Press, 1983.
26. *Caddell R.M., Raghava E.S., Atkins A.G.* A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers // J. Materials Sci. 1973. V. 8. P. 1641–1646.
27. *Lui C., Huang Y., Stout M.G.* On the asymmetric yield surface of plastically orthotropic materials: a phenomenological study // Acta Mater. 1997. V. 45. № 6. P. 2397–2406.