

УДК 539.3
UDC 539.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ВЕРТИКАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН ДО СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ОПЕРАЦІЇ ОПРЕСУВАННЯ

Худолій С.М., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ,
Україна

Мазурок П.С., ТОВ «Сервіс кріплення свердловин»

MATHEMATICAL MODELING OF VERTICAL WELLS STABILITY WITH RESPECT TO STATIC LOADS AT PRESSURE TESTING

Hoodoliy S.M., Ph.D., National Transport University, Kyiv, Ukraine

Mazurok P.S. LTD "Service of Bore-Hole Strengthening"

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИН К СТАТИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ ПРИ ОПЕРАЦИИ ОПРЕССОВЫВАНИЯ

Худолій С.Н., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев,
Украина.

Мазурок П.С., ООО «Сервис крепления скважин»

Постановка проблеми.

В процесі будівництва та експлуатації, свердловина піддається складній комбінації знакозмінних навантажень. Проектною документацією передбачена робота свердловини протягом не менше ніж 11 років. Головною умовою безаварійної роботи свердловини протягом всього строку експлуатації є збереження герметичності. Під дією механічних, гідравлічних та термічних навантажень можливе порушення герметичності кріпці, внаслідок: руйнування цементного каменю, розшарування контакту «обсадна колона – цементний камінь», тріщиноутворення в цементному каменю.

Типи навантажень, які діють на систему:

- Надлишковий тиск всередині обсадної колони внаслідок нагнітання додаткових об'ємів рідини в процесі опресування.
- Нагнітання рідини в перфораційні отвори при проведенні операції по гідророзриву пластів.
- Вибухові та ударні навантаження при перфорації.
- Різкі температурні перепади

Кріплення представляє собою тришарове тіло «обсадна колона – цементний камінь – гірська порода».

«Свердловиною» вважається зацементована обсадна колона, на різних етапах будівництва свердловини (кондуктор, проміжна або технічна колона, експлуатаційна колона, хвостовик або бічний стовбур).

На контакті між цементним каменем та гірською породою існує так звана «фільтраційна кірка», яка представляє собою спресовані частини твердої фази бурового розчину, що утворюються на поверхні проникливих гірських порід в результаті фільтрації рідини із бурового розчину під дією перепаду тиску.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанням дослідження напружено-деформованого стану зацементованих свердловин присвячено велику кількість наукових публікацій. У вітчизняній літературі можна відмітити статті [1-3] в яких звернуто увагу на необхідність формування вимог до властивостей цементного каменю [1] та дослідження тріщиностійкості всієї системи на етапах завершення свердловини та її функціонування [2,3]. В роботі [4] методом скінчених елементів проведено аналіз механічної поведінки низу вертикальних, горизонтальних та похилих свердловин. В роботі [5] на основі постановки плоскої задачі деформування свердловини досліджено поля напружень в обсадній трубі та породі з урахуванням можливої ексцентричності цементування системи. Стаття [6] присвячена вивченню механізму послаблення свердловини в результаті

зношування системи обсадна труба – цемент – порода. В статті [7] для дослідження стійкості конструкції застосовується тривимірна скінчено-елементна модель для випадку ексцентричного цементування системи. Впливу геотермічних збурень на циклічну поведінку низу свердловини присвячена робота [8]. В ній розглянуто вплив суцільного та спіненого цементу на усадку цементного каменя та стійкість системи. Відзначені публікації дозволяють зробити висновки, що процеси що супроводжують завершення свердловини досить складні та не достатньо вивчені, тому розглянута проблема є актуальною.

Мета роботи полягає у створенні математичної моделі і програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання стійкості конструкції свердловини (яка включає обсадну трубу, цементний камінь, глинисту кірку та навколишню породу) до дії статичних навантажень.

Основна частина.

В запланованому стані конструкція низу свердловини включає сталеву трубчасту обсадну колону, вставлену концентрично в циліндричну порожнину свердловини. Простір між зовнішньою поверхнею обсадної колони і стінкою свердловини заповнюється цементним розчином, який перетворюється при затвердінні в цементний камінь. На граничній циліндричній поверхні між цементним каменем і гірською породою утворюється так звана глиниста кірка, яка володіє проміжними фізико-механічними властивостями між цементом і породою. В якості гірської породи задано аргіліт. Схематичне зображення ділянки свердловини, що розглядається, представлено на рис. 1.

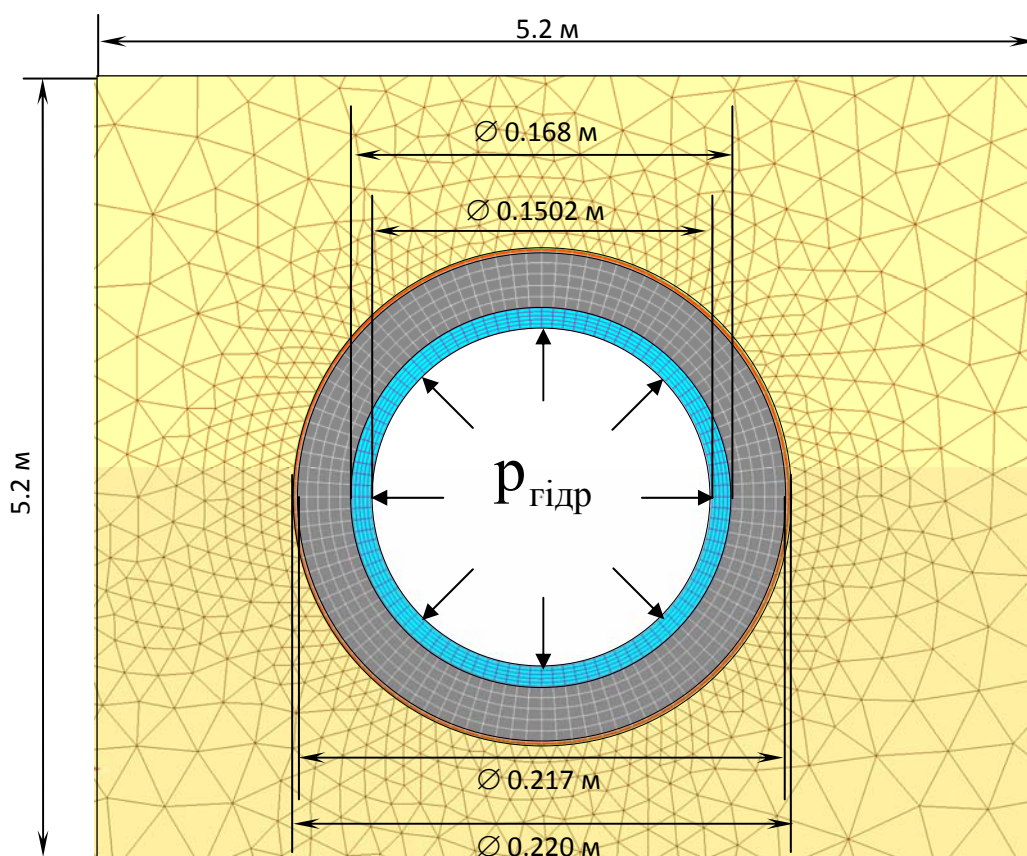


Рисунок 1 – Схема виділеної для розрахунку частини гірської породи з елементами конструкції обсадної труби

На схемі показано виділений для розрахунку переріз конструкції обсадної колони з ділянкою гірської породи розміром $5.2 \times 5.2 \text{ м}^2$ і заданими значеннями геометричних розмірів.

Вважається, що навантаження обсадної колони здійснюється за рахунок статичної дії внутрішнього тиску p .

Методика комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану низу свердловини. Моделювання статичного пружно-пластичного деформування системи здійснюється на основі рівнянь теорії пружності і пластичності. Вони включають рівняння рівноваги, нелінійні рівняння стану (діаграми навантаження) і рівняння кінематики, які пов'язують відносні деформації і переміщення. За допомогою методу скінченних елементів система диференціальних рівнянь з частинними похідними приводиться до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які розв'язуються далі методом Ньютона у поєднанні з методом продовження розв'язку за параметром. Аналіз пружного деформування конструкції на кожному кроці реалізується розв'язком лінеаризованої системи алгебраїчних рівнянь для скінчено-елементної моделі

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} - \{r\} \quad (1)$$

Тут $[K]$ – лінеаризована матриця жорсткості системи; $\{\Delta u\}$ – шуканий вектор приростів переміщень; $\{\Delta f\}$ – вектор приростів заданих сил; $\{r\}$ – вектор нев'язок.

Далі за знайденими значеннями переміщень вузлів скінчених елементів підраховуються пружні і пластичні відносні деформації і напруження.

Точність скінченно-елементної апроксимації перевіряється шляхом згущення скінченно-елементної решітки.

Механічні властивості матеріалів, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Механічні властивості матеріалів

	Матеріал	Модуль пружності E_1 , Па	Коефіцієнт Пуассона ν	Густина ρ , кг/м ³	Межа текучості σ_T , Па
1	Аргіліт	$7 \cdot 10^9$	0.2	2540	$18 \cdot 10^7$
2	Цементна кірка	$1,025 \cdot 10^{10}$	0.2	2300	$9,5 \cdot 10^7$
3	Цементний камінь	$1,35 \cdot 10^{10}$	0.25	2200	$1,03 \cdot 10^7$
4	Сталь	$2,06 \cdot 10^{11}$	0.3	7500	$35 \cdot 10^7$

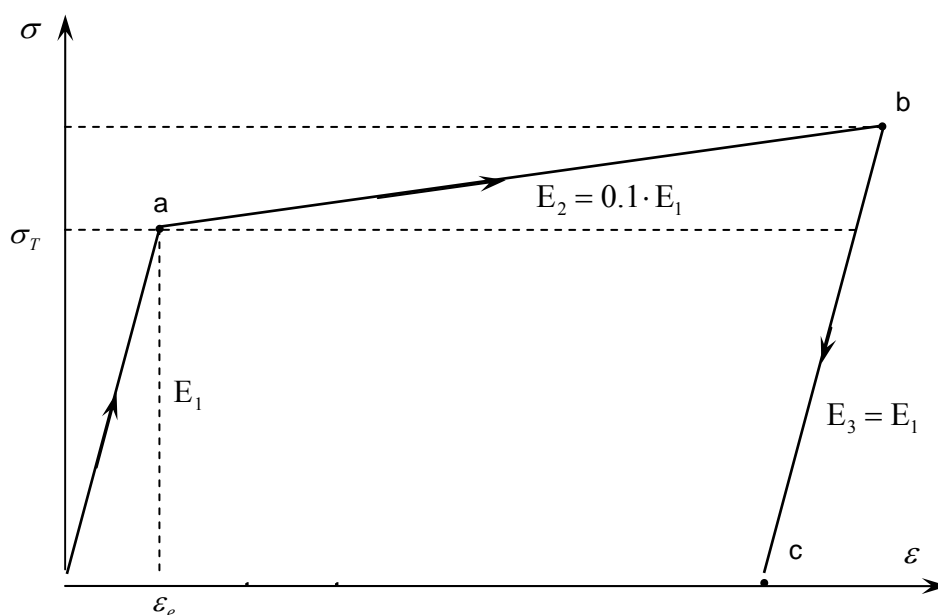


Рисунок 2 – Діаграма навантаження для матеріалів системи

Діаграма пружно-пластичного навантаження матеріалів представлена на рис.2. На ділянці пружного навантаження від нуля до напруження Мізеса $\sigma_{Mis} = \sigma_T$ модуль пружності E_1 , коефіцієнт Пуассона ν . Ділянка пружно-пластичного навантаження ab . Для цієї ділянки $E_2 = 0.1 \cdot E_1$. Третій етап bc – разгрузка, де σ зменшується до значення 0. На цьому етапі, $E_3 = E_1$.

Вважалось, що матеріал переходить у пружно-пластичну стадію роботи після досягнення максимального напруження за критерієм Мізеса величини σ_T . Після цього модуль пластичності досягає величини $E_1/10$. В результаті розрахунків обчислюються пластичні деформації і напруження після активного навантаження і розвантаження.

Навантаження на систему при опресуванні

Однією з технологічних операцій з зацементованою свердловиною являється перевірка її герметичності методом опресування. Вважається, що на заданій глибині у вихідному стані (етап 1) тиск в породі і у свердловині складає $p = 200$ атм $\approx 200 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 \approx 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$. На другому етапі тиск в породі на віддаленні від свердловини залишається $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$, але в свердловині він статичним чином збільшується до $p = 700$ атм. На третьому етапі тиск в породі на віддаленні від свердловини залишається незмінним, рівним $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$, в той же час, в свердловині він знову статичним чином падає до $p = 200$ атм.

Необхідно розрахунковим шляхом встановити напружено-деформований стан системи на всіх трьох етапах навантаження і залишкові пластичні деформації в системі після зняття обпресувального навантаження (на етапі 3).

Скінченно-елементні моделі низу свердловини. Модель конструкції з концентричним розміщенням колони в свердловині кругового перерізу. Для комп'ютерного моделювання вибрано плоский переріз конструкції разом із квадратною частиною породи розміром $5.2 \times 5.2 \text{ м}^2$. Вважається, що на поверхнях контакту між обсадною трубою, цементним каменем, кіркою і породою здійснюється зчеплення без проковзування (рис. 1).

Конструкція апроксимувалася плоскими трикутними і чотирикутними скінченними елементами. Загальна кількість скінченних елементів склала 7868, число вузлів дорівнює 4585, число шуканих переміщень дорівнює 22 816.

Результати скінченно-елементного аналізу низу свердловини при проведенні операції опресування. Випадок центрального розміщення обсадної колони в круговій свердловині

Результати розрахунків дані на рис. 3-5 у вигляді полів напружень σ_x і пластичних деформацій, які досягаються після закінчення кожного етапу навантаження. Зазначимо, що поля напружень σ_y у всіх випадках можуть бути представлені шляхом повороту полів σ_x на 90° .

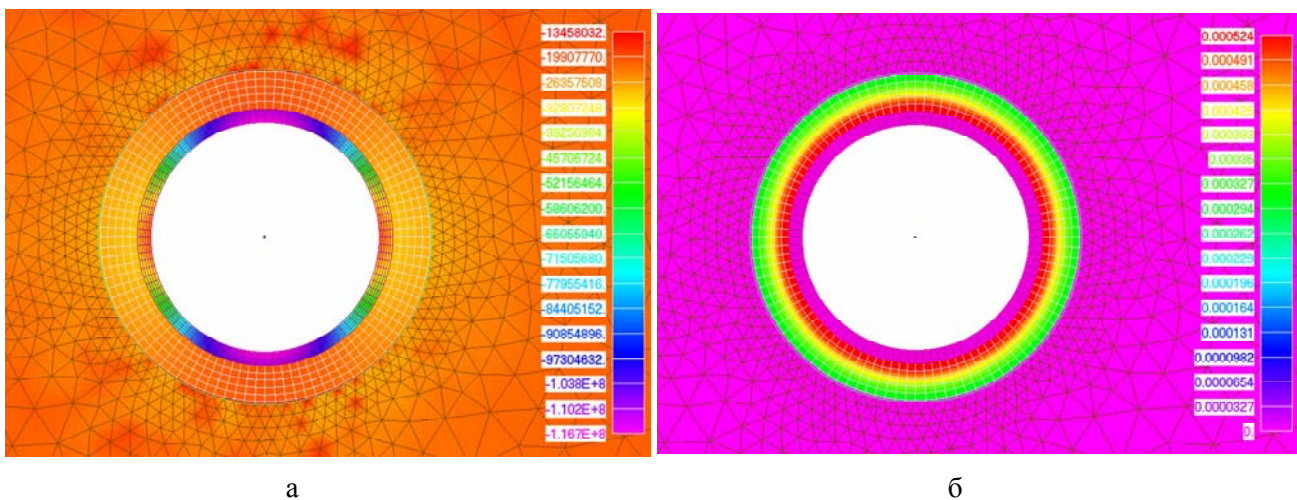


Рисунок 3 – Поле нормальних напружень σ_x (Па) (а) та поле розподілу пластичних деформацій (в безрозмірних величинах) (б) в системі при дії загального тиску в породі $p_{срав} = 200$ атм (≈ 20 МПа), та тиску у свердловині $p_{сидр} = 200$ атм (≈ 20 МПа)

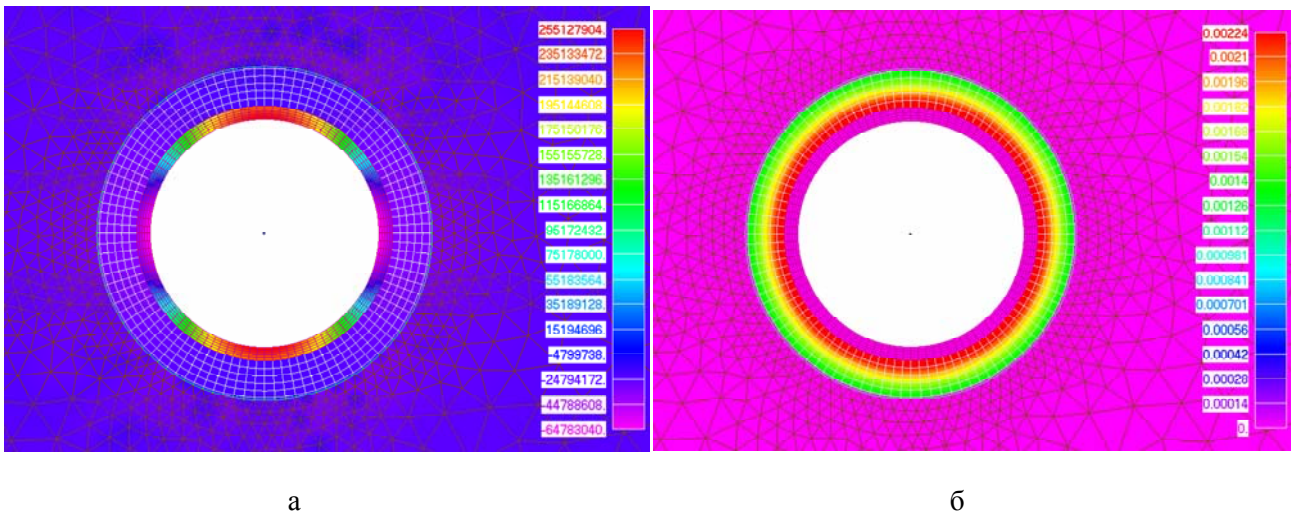


Рисунок 4 – Поле нормальних напружень σ_x (Па) (а) та поле розподілу пластичних деформацій (в безрозмірних величинах) (б) в системі при дії загального тиску в породі $p_{\text{зрав}} = 200$ атм (≈ 20 МПа), та тиску у свердловині $p_{\text{зідр}} = 700$ атм (≈ 70 МПа)

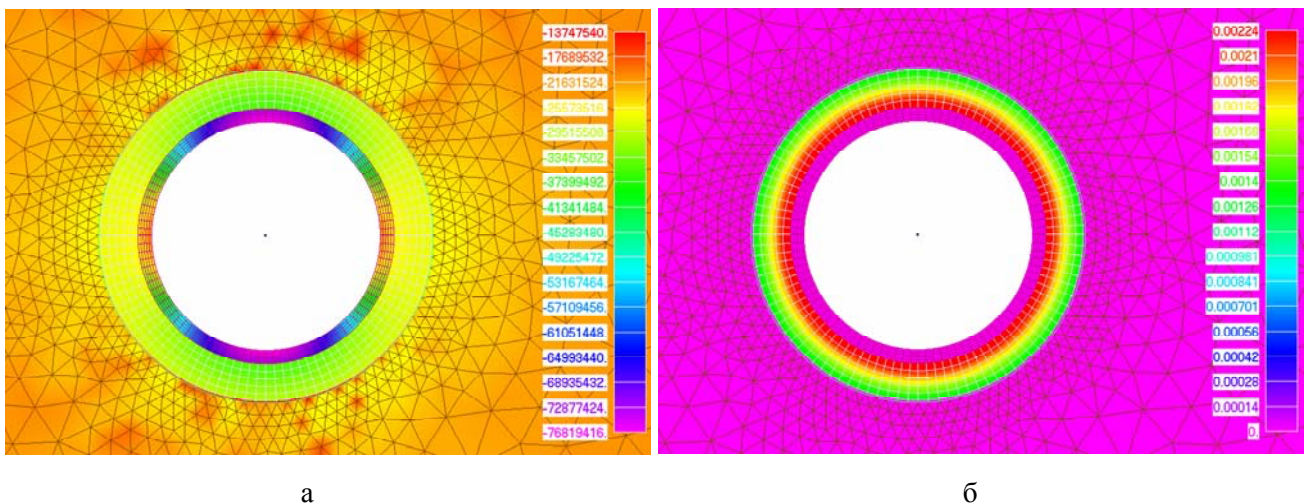


Рисунок 5 – Поле нормальних напружень σ_x (Па) (а) та поле розподілу пластичних деформацій (в безрозмірних величинах) (б) в системі при дії загального тиску в породі $p_{\text{зрав}} = 200$ атм (≈ 20 МПа), та зменшенні гідростатичного тиску у свердловині $p_{\text{зідр}}$ на 500 атм.

Висновки

За результатами розрахунків можна зробити наступні висновки:

Напружено-деформований стан системи визначається великим числом параметрів, які в свою чергу залежать від умов експлуатації системи. Багато з цих параметрів визначені дуже наближено. Тому для більш адекватного моделювання розглянутих процесів необхідно експериментально визначити властивості матеріалів системи.

Під дією статичних навантажень (опресування) в деяких зонах конструкції спостерігаються напруження розтягу (додатного знаку). Оскільки такі матеріали як цементний камінь та аргіліт дуже слабо опираються розтягуючим силам, можна очікувати, що з перебігом часу в цих зонах буде відбуватися розтріскування матеріалу і втрата герметичності в цій зоні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Самсыкин А.В. Оценка влияния динамических нагрузок на формирование требований к свойствам цементного камня / А.В. Самсыкин, А.Ф. Галиев, Ф.А. Агзамов, М.А. Тихонов, Ф.У.

Еникеев, А.В. Самсыкина // Нефтегазовое дело. Научно-технический журнал – 2012. – Т. 10, №1. С. 8-12.

2. Гриманюк В.І. Дослідження тріщиностійкості армованого тампонажного каменю для кріплення нафтових і газових свердловин / Гриманюк В.І. // Науковий вісник НГУ.-2014. – №1. С. 5-10.

3. Каринцев И.Б. Напряженно-деформированное состояние цементного кольца в буровой скважине / Каринцев И.Б., Жулев А.А. // Вісник СумДУ, Серія «Технічні науки».-2013. – №4. С. 152-159.

4. Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability/ M. Aslannejad, A.K. Manshad, H. Jalilifar //American Journal of Oil and Chemical Technologies – 2013. – V.1, issue 8. P. 10-19.

5. W.W. Fleckenstein. Cemented Casing: The True Stress Picture/ Fleckenstein W.W., Eustes A. W., Rodriguez W.J., Berger A., Sanchez F.J.// AADE Conference – 2005. – AADE-05-NTCE-14, P. 1-8.

6. Z. Shen. The Mechanism of Wellbore Weakening in Worn Casing-Cement-Formation System/ Shen Z., Beck F.E., Ling K.// Journal of Petroleum Engineering – 2014. – V.1, P 1-8.

7. Liu J. Numerical Simulation on Open Wellbore Shrinkage and Casing Equivalent Stress in Banded Rock Stratum/ J. Liu, L. Zhang, J. Zhao.// The Scientific World Journal – 2013. – V.1, P. 1-5.

8. McCulloch J. Life Cycle Modeling of Wellbore Cement Systems Used for Enhanced Geothermal System Development/ McCulloch J., Gastineau J., Bour D.L., Ravi K. // Geothermal Resources Council Transactions – 2003. – V. 27, P. 147-154.

REFERENCES

1. Samsykin A.V. Evaluating impact load for cement stone specifications / A.V. Samsykin, A.F. Galiev, F.A. Agzamov, M.A. Tikhonov, F.U. Enikeev, A.V. Samsykin // Oil and gas business. Scientific and technical journal – 2012. – V. 10, №1. P. 8-12. (Rus)

2. Hrymaniuk V.I. Investigation of reinforced cement stone cracking resistance for casing oil and gas wells / Hrymaniuk V.I.// Scientific Bulletin of National Mining University.-2014. – №1. P. 5-10. (Ukr)

3. Karintsev I.B. Deflected mode of cement ring in bore / Karintsev I.B., Zhulyov A.A. // Bulletin of SSU, series "Engineering".-2013. – №4. P. 152-159. (Rus)

4. Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability/ M. Aslannejad, A.K. Manshad, H. Jalilifar //American Journal of Oil and Chemical Technologies – 2013. – V.1, issue 8. P. 10-19.

5. W.W. Fleckenstein. Cemented Casing: The True Stress Picture/ Fleckenstein W.W., Eustes A. W., Rodriguez W.J., Berger A., Sanchez F.J.// AADE Conference – 2005. – AADE-05-NTCE-14, P. 1-8.

6. Z. Shen. The Mechanism of Wellbore Weakening in Worn Casing-Cement-Formation System/ Shen Z., Beck F.E., Ling K.// Journal of Petroleum Engineering – 2014. – V.1, P 1-8.

7. Liu J. Numerical Simulation on Open Wellbore Shrinkage and Casing Equivalent Stress in Banded Rock Stratum/ J. Liu, L. Zhang, J. Zhao.// The Scientific World Journal – 2013. – V.1, P. 1-5.

8. McCulloch J. Life Cycle Modeling of Wellbore Cement Systems Used for Enhanced Geothermal System Development/ McCulloch J., Gastineau J., Bour D.L., Ravi K. // Geothermal Resources Council Transactions – 2003. – V. 27, P. 147-154.

РЕФЕРАТ

Худолій С.М. Математичне моделювання стійкості вертикальних свердловин до статичних навантажень при операції опресування. / С.М. Худолій, П.С. Мазурок // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

В даній роботі виконано комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану конструкції низу свердловини під дією гравітаційного тиску від вище лежачих шарів порід, гідростатичного тиску в обсадній трубі при проведенні операції опресування.

Побудована скінченно-елементна модель конструкції для випадку, коли обсадна колона встановлена центрально по відношенню до кругової стінки свердловини.

Результати розрахунків представлені у вигляді полів напружень і деформацій на виділеній для розрахунку області.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАПРУЖЕННЯ, ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНІ ДЕФОРМАЦІЇ, СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ, СВЕРДЛОВИНА, ОПРЕСУВАННЯ.

ABSTRACT

Hoodoliy S.M., Mazurok P.S. Mathematical modeling of vertical wells stability with respect to static loads at pressure testing. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

In the paper, the computer simulation of the stress-strain state of bore-hole bottom structure is fulfilled for the case of the rock weight load action on the casing tube in the pressure testing operation.

The finite element model of the system structure is developed for the situation when the casing tube is intruded centrally into the bore-hole circular wall.

The calculation results are represented as the field of stresses and strains in the domain separated for calculations.

KEY WORDS: STRESS, ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION, FINITE ELEMENT ANALYSIS, BOREHOLE, PRESSURE TESTING

РЕФЕРАТ

Худолий С.Н. Математическое моделирование устойчивости вертикальных скважин к статическим нагрузкам при операции опрессовывания. / С.Н. Худолий, П.С. Мазурок // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вып. 1 (31).

В данной работе выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции низа скважины под действием гравитационного давления от вышележащих слоев пород, гидростатического давления в обсадной трубе при проведении операции опрессовки.

Построена конечно-элементная модель конструкции для случая, когда обсадная колонна установлена центрально по отношению к круговой стенке скважины.

Результаты расчетов представлены в виде полей напряжений и деформаций на выделенной для расчета области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НАПРЯЖЕНИЯ, УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ, СКВАЖИНА, ОПРЕССОВКА

АВТОР:

Худолий Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики, Національний транспортний університет, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, тел. +38953339582, Україна, 01010, м. Київ, вул. Кіквідзе 42, к. 511.

AUTHOR:

Hoodoliy Sergiy Mykolayovych, Ph.D., associate professor department of high mathematics, National Transport University, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, тел. +38953339582, Ukraine, 01010, Kyiv, Kikvidze str. 42, of. 511.

АВТОР:

Худолий Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Национальный транспортный университет, e-mail: s_hoodoliy@i.ua, тел. +38953339582, Украина, 01010, г. Киев, ул. Киквидзе 42, к. 511.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Рассказов О.О., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

Гайдайчук В.В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри теоретичної механіки, Київ, Україна.

REVIEWER:

Rasskazov O.O., Dr. Sc., Professor, National Transport University, head of the Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.

Gaidachuk V.V., Dr. Sc., Professor, Kyiv National University of Structures and Architecture, head of the Department of Theoretical Mechanics, Kyiv, Ukraine.