

Применение геомеханического моделирования при проектировании резервуаров сложной формы в составе подземных хранилищ газа

В.А. Перфилов, В.В. Петров

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: Горные породы, которые образуют естественный геологический резервуар для подземного хранения газа, в процессе эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ), находятся в условиях воздействия длительных циклических нагрузок, обусловленных периодическими закачками и отборами природного газа. При этом возможно развитие и накопление в горных породах остаточных деформаций, которые вызывают необратимые изменения свойств пород и это необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ПХГ.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, геомеханическое моделирование, каверна, соляной массив, деформации.

Подземные газохранилища газа (ПХГ) необходимы для эффективного функционирования газотранспортной системы, так как они позволяют сгладить негативные последствия неравномерного газопотребления. Их используют для покрытия кратковременных периодов дефицита газа. Часто такие пиковые хранилища создаются в виде подземных резервуаров в каменной соли [1,2], поскольку они позволяют значительно быстрее производить отбор газа, чем это возможно при хранении газа в пористых геологических пластах. Полости могут иметь пролет до 80 м, высоту до нескольких сотен метров и вместимость от десятков тысяч до миллиона кубометров. Все существующие в мире подземные резервуары расположены в соляных толщах, залегающих, как правило, на глубинах 300–1400 м. Создание подземных выработок приводит к изменению напряженного состояния массива горных пород, а также к уменьшению объема выработанного пространства (конвергенции полости) в результате ползучести каменной соли [3,4]. Конвергенция происходит в течение всего времени эксплуатации. Для того чтобы прогнозировать начальное напряженное состояние осадочной толщи и его изменения в процессе

сооружения и эксплуатации подземных хранилищ, необходимо создавать модель резервуара [5,6].

Современные компьютерные технологии позволяют выполнять исследования практически любой степени сложности для оценки геомеханических процессов, протекающих при разработке месторождений или эксплуатации подземных хранилищ. Сегодня речь идет уже о создании геомеханических моделей по аналогии с их геологическими моделями, которые позволяли бы выполнять комплексный анализ на всех этапах жизненного цикла месторождения или подземного хранилища [7].

Геомеханическое обоснование технологических решений по созданию и эксплуатации ПХГ может быть выполнено на основании геомеханической модели ПХГ, которая наряду с геологической моделью должна разрабатываться на стадии геолого-разведочных работ и корректироваться при обустройстве и эксплуатации

Целью исследования было построение модели и выявление процессов деформации и разрушения, возникающих в элементах подземного резервуара, созданного в отложениях каменной соли.

Процесс первичной закачки газа моделировался методом последовательной смены стационарных состояний по следующим причинам:

- сложная геометрическая форма и ее потенциальная возможность адаптации геометрической формы выработки и приведение формы к ассиметричной форме не позволяет упростить форму до тела вращения и свести задачу в 2D.

- задачи подбора геометрической формы для надежной эксплуатации выработки сводятся к многовариантным расчетам, что невозможно реализовать с помощью «честного» гидродинамического моделирования в силу больших затрат по вычислительным мощностям и времени.

Для разделения процесса на стационарные состояния были предприняты следующие шаги:

1. Давление внутри выработки было разделено на две составляющие: гидростатическое давление (только жидкость внутри каверны) и давление газа (только газ).

2. На каждом стационарном состоянии изменялась вертикальная координата свободной поверхности.

3. На каждом стационарном состоянии изменялось давление газа из условия, что на забое внутренней колонны НКТ постоянно.

В текущем варианте предполагаем, что вытеснение происходило при условии постоянного забойного давления 24 МПа на забое внутренней НКТ, по которой и идет вытеснение жидкости вверх.

Горное давление – давление, создаваемое весом залегающих над газом пород. Примем горное давление, необходимое для исходных данных при моделировании по формуле (1):

$$P_{\text{гор}} = 0,1 g_{\text{п}} L, \quad (1)$$

где $P_{\text{гор}}$ – горное давление в кгс/см²;

$g_{\text{п}}$ – средний удельный вес горных пород всех вышележащих пластов с учётом насыщающих их жидкостей в гс/см³ или тс/м³;

L – глубина, считая от поверхности земли до точки пласта, в которой определяется горное давление в м.

Примем, что $g_{\text{п}} = 2$ гс/см³.

Примем, что $L = 1300$ м.

Исходя из вышеописанных данных, рассчитываем горное давление, которое составит 25 МПа.

За исходные данные был принят подземный резервуар, представляющий собой двухкамерную выработку в отложениях каменной соли. Камеры резервуара разного объема и геометрической формы. Размеры рассматриваемого резервуара – радиус верхней камеры 45 м, высота 45 м, радиус нижней камеры 50 м, высота 18 м.

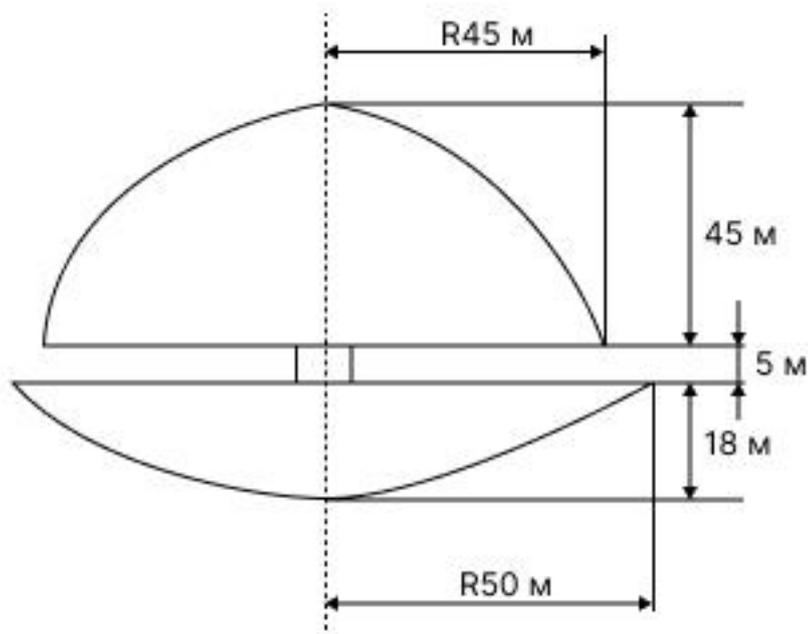


Рис. 1. Геометрические размеры рассматриваемого резервуара

Геомеханическая характеристика пород рассмотрена в таблице 1.

Таблица 1

Определение газопроницаемости на образцах горных пород
 рассматриваемой скважины

Характеристика	Соляной пласт	Ангидрит
Плотность, кг/м ³	2200	2900
Модуль Юнга, ГПа	4	71
Коэф. Пуассона	0,24	0,23
Предел прочности на растяжение, МПа	1,08	45
Предел прочности на сжатие, МПа	20	0,13

На момент начала моделирования резервуар заполнен рассолом плотностью $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Отличительной особенностью подземного резервуара является наличие непроницаемого пропластка из ангидрита в зоне, в месте соединения двух камер. Мощность пропластка составляет 5 м. Диаметр пробуренного отверстия в пропластке 218 мм.

В процессе первоначального заполнения газом подземного резервуара по затрубному пространству и вытеснения рассола по НКТ (114 мм). В верхней границе модели приложена нагрузка от вышележащих пород, а по контуру действует нагрузка от противодействия среды, заполняющей каверну [8-10].

Моделирование велось в 7 шагов. Постепенно с каждым шагом объем рассола в резервуаре снижается.

Объем рассола перед началом его вытеснения составляет $232\,966 \text{ м}^3$. Моделируется закачка газа в подземный резервуар. Градиент распределения давлений в начале вытеснения рассола показан на рисунке 2.

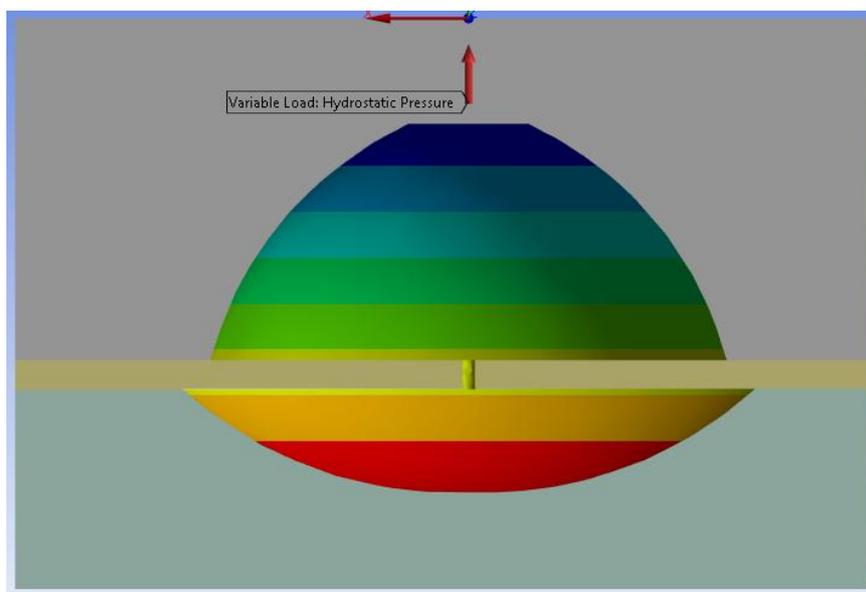


Рис. 2. Распределение давлений в подземном резервуаре. Шаг 0.

Видно, что с самого начала вытеснения на пропласток действует давление в диапазоне 24,47 – 24,56 МПа. Тем самым увеличиваются напряжения, возникающие в пропластке до их величины 86 МПа в верхней его части – зоне течения рассола из верхней камеры в нижнюю (рисунок 2).

Давление газа в подземном резервуаре постепенно повышается, образуется «газовая шапка» в верхней его части, газ продавливает рассол, и рассол поднимается по колонне НКТ $\varnothing 114$ мм на поверхность, тем самым происходит вытеснение. С самого начала закачки природного газа в резервуар и начале вытеснения рассола на стенки резервуара действуют давления заполняющей его среды и давление пород. В то же время на пропласток в зоне прохода через него колонны НКТ действует давление среды (24,5 МПа) и в нем возникают напряжения величиной 86 МПа.

По мере увеличения давления газа и снижения объема рассола в резервуаре напряжения, возникающие в рассматриваемом пропластке только увеличиваются. На шаге №1 значения напряжений составляют 86,3 МПа (рисунок 3). Объем рассола в каверне на шаге №1 составил 220 615,9 м³.

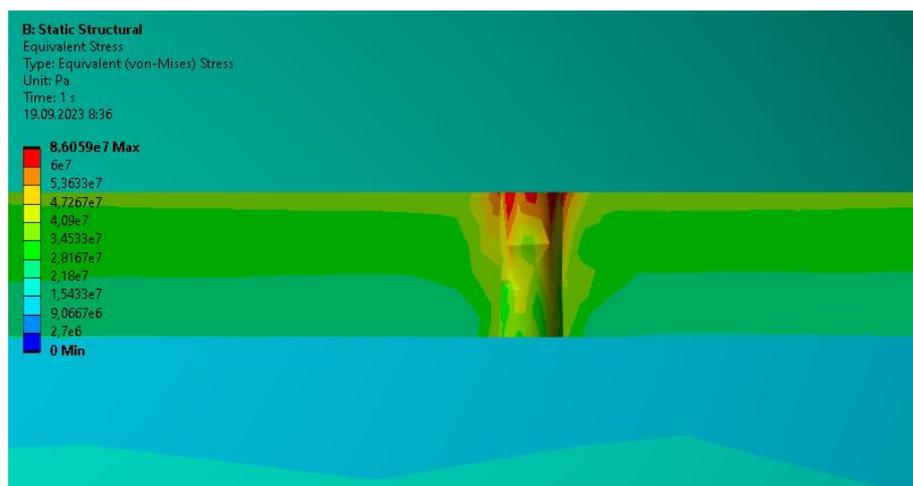


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений у перехода между камерами резервуара, шаг №1

Учитывая данные шага №2 вытеснения видно, что треть верхней камеры уже заполнена газом, часть объема вытеснена на поверхность. Остаток рассола в каверне составляет 205 749,80 м³.

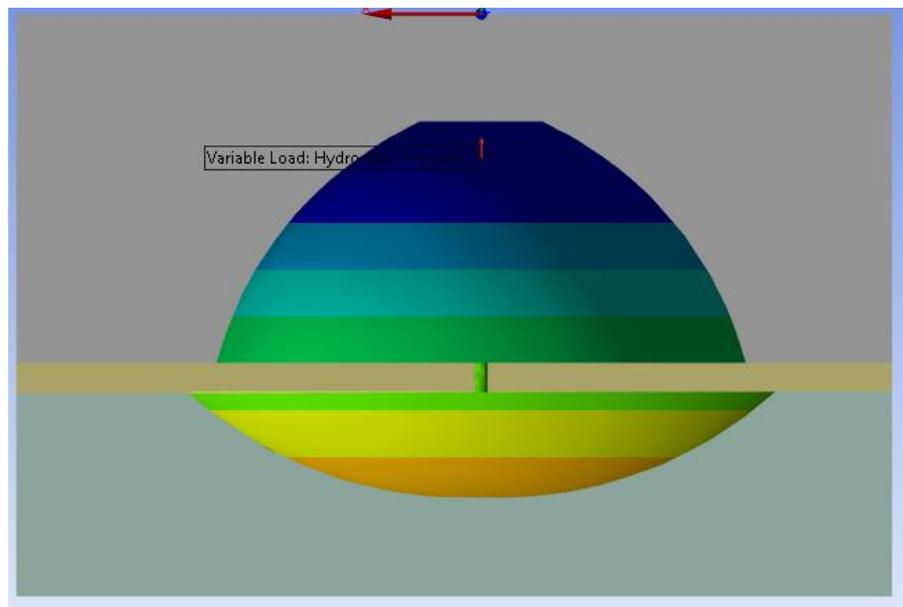


Рис. 4. Распределение давлений в подземном резервуаре. Шаг 2

Давление на породе пропластка несколько снизилось до значения 24,56 МПа, о чем говорит изменения цвета зоны прохода НКТ через пропласток на более зелёный (рисунок 4), а напряжение в пропластке только увеличилось до 86,6 МПа.

Во время шага №3 давление, действующее на пропласток, держится в пределах 24,47 МПа, происходит увеличение возникающих в пропластке напряжений в той же области до значений 86,8 МПа.

Рассматривая шаги вытеснения №4 и №5, в которых объем рассола в верхней камере резервуара оказывается вытесненным, наблюдаем следующую картину – давление, действующее на пробуренную зону пропластка несколько снижается до значений 24,12 – 24,47 МПа (рисунок 5),

однако величины возникающих деформаций остаются равными значениям 86,60 – 86,65 МПа.

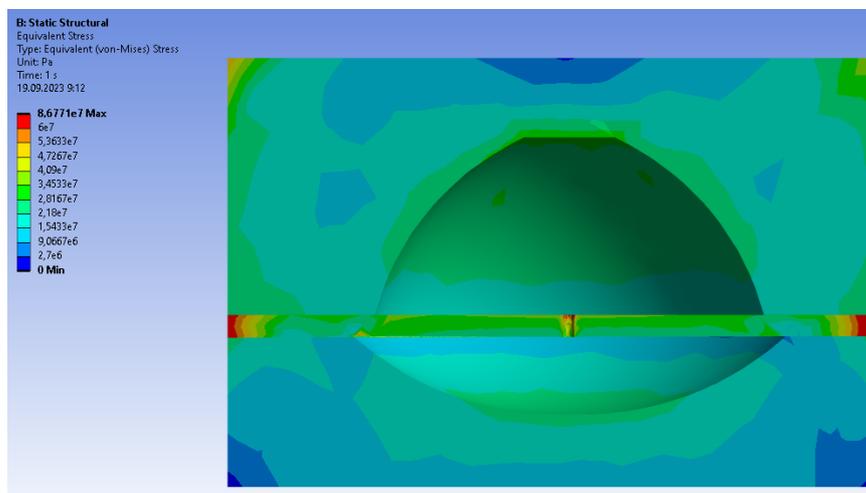


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений у перехода между камерами резервуара, шаг №5

Рассматривая шаги вытеснения №6 и №7, видим на них похожую ситуацию, касательно действующих на пропласток давлений – 24,04 МПа, и напряжений в породе пропластка – 86,77 МПа в шаге №6 и 84,77 МПа в шаге №7. Объем рассола в шаге №6 – 99 873,59 м³, в шаге №7 – 32 439,76 м³.

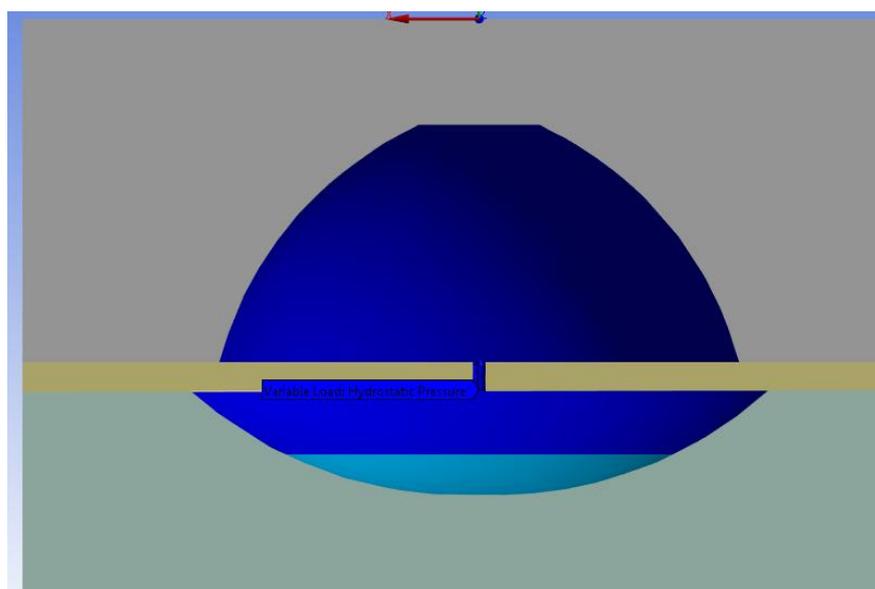


Рис. 6. Распределение давлений в подземном резервуаре, шаг №6

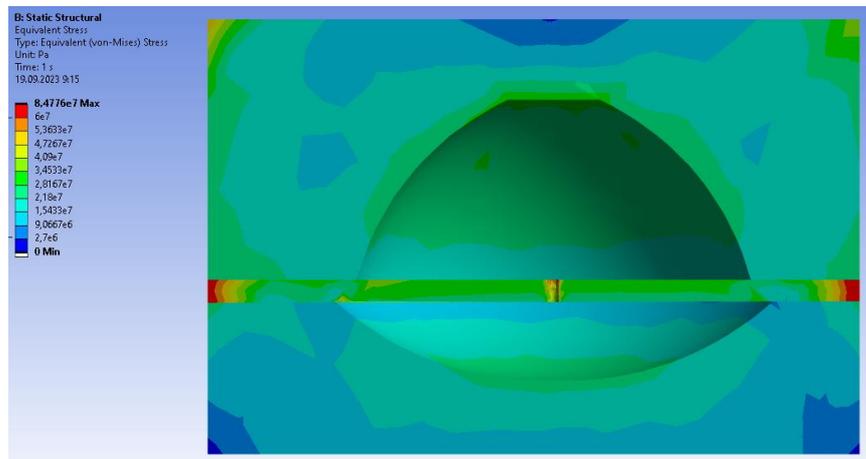


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений у перехода между камерами резервуара, шаг №7 (фаза полного вытеснения рассола из резервуара)

Вплоть до конца вытеснения рассола наблюдается картина с аналогичными значениями напряжения в пропластке из ангидрита. Учитывая то, что предел прочности ангидрита на сжатие составляет 60 МПа и в месте соединения двух камер резервуара замечено превышение предельного значения, что говорит нам о разрушении и деформации данной области.

На основании результатов моделирования виден следующий результат:

– по итогам проведенного моделирования в статике отчетливо видно превышение предельных значений напряжения в зоне прохода колонны НКТ через пропласток из ангидрита, что свидетельствует о возникновении деформаций и разрушений рассматриваемой зоны;

При проектировании и моделировании подземных резервуаров в отложениях каменной соли сложной формы, в том числе, резервуаров, состоящих из двух камер, необходимо проводить исследования и рассматривать множество вариантов конфигурации как самой формы и объема резервуара, так и отдельных его элементов, таких как размеры и

положение отверстия, размеры колонны, спущенных в подземный резервуар. Моделирование должно проводиться в динамике, так как статический анализ может не дать необходимых данных.

На основании построенных динамических моделей и проведения анализа полученных данных необходимо будет выбрать ту конфигурацию резервуаров и его элементов, при которой не будут возникать критических деформации.

Литература

1. Pellet F.L. Rock mechanics and environmental engineering for energy and georesources // EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. St. Petersburg, Russia, 22–26 May 2018. London: Taylor & Francis Group, 2018. pp. 87–93.
 2. Li J., Shi X., Yang C. et al. Repair of irregularly shaped salt cavern gas storage by re-leaching under gas blanket // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 45. pp. 848–859.
 3. Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л., Особенности деформирования каменной соли при повышенных температурах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. - № 1. - С. 69-76.
 4. Singh A., Kumar C., Kannan L.G. Rao K.S., Ayothiraman R. Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, pp. 243-248.
 5. Агеенко В.А. Исследование реологических свойств каменной соли // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – Вып. 1(53). – С. 115-120.
 6. Ковалев А.Л., Шеберстов Е.В. Геомеханическая модель горного массива, содержащего разрабатываемую нефтегазовую залежь или подземное хранилище газа // Вести газовой науки. – 2013. – № 1. – С. 204–215.
-

7. Шахов Д.С. Программное обеспечение для решения комплексных задач геомеханического моделирования (Schlumberger Information Solutions) // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 142–143.

8. Yuping Zh. A micromechanics-based damage constitutive model of porous rocks // International journal of rock mechanics and mining sciences. – 2016. – № 91. – pp. 1–6.

9. Закавова А.А., Манько А.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния реконструируемого Кузнецовского тоннеля // Инженерный вестник Дона, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9211.

10. Страданченко С.Г., Молев М.Д., Дмитриенко В.А. Моделирование смещений грунтового контура подземных сооружений // Инженерный вестник Дона, 2023, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8468.

References

1. Pellet F.L. Rock mechanics and environmental engineering for energy and georesources EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. St. Petersburg, Russia, 22–26 May 2018. London: Taylor & Francis Group, 2018. pp. 87–93.
2. Li J., Shi X., Yang C. et al. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. Vol. 45. pp. 848–859.
3. Kravchenko O.S., Filimonov YU.L., Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2019. № 1. pp. 69-76.
4. Singh A., Kumar C., Kannan L.G. Rao K.S. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, pp. 243-248.
5. Ageenko V.A. Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 2019. Vyp. 1(53). pp. 115-120.



6. Kovalev A.L., Sheberstov E.V. Vesti gazovoj nauki. 2013. № 1. pp. 204–215.
7. Shakhov D.S. Neftyanoe khozyajstvo. 2014. № 12. pp. 142–143.
8. Yuping Zh. International journal of rock mechanics and mining sciences. 2016. № 91. pp. 1–6.
9. Zakavova A.A., Man'ko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9211.
10. Stradanchenko S.G., Molev M.D., Dmitrienko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8468.

Дата поступления: 22.10.2024

Дата публикации: 9.12.2024