Научная статья / Scientific paper
УДК: 624.131.3
DOI: 10.34753/HS.2025.7.2.206

Сравнительный анализ зарубежных и отечественных методик расчета плотности песков по результатам статического зондирования

А. Г. Арапов [1], Д. В. Моргунов [1], Д. Р. Надергулова [2], Ю. М. Замалутдинова [3]
[1] ООО «МП «ЭнергоИнвест», г. Тюмень, Россия; [2] ООО «Геосфера», г. Нижневартовск, Россия; [3]ООО НИПИ «Нефтегазпроектэкспертиза», г. Тюмень, Россия
e-mail: arapovgeo@gmail.com

Аннотация. Статическое зондирование является одним из наиболее доступных и достаточно достоверных для целей проектирования способом определения плотности песчаных грунтов в массиве, в том числе, расположенных ниже уровня грунтовых вод. Как известно, отбор монолитов таких грунтов с помощью грунтоносов затруднен и далеко не всегда целесообразен, а соответственно, распространенный, в нормативной документации метод «режущего кольца» выполнить не представляется возможным. Альтернативный метод замещения объема, доступный для применения на поверхности, либо в шурфах также не решает проблему определения плотности на больших глубинах. Гамма-гамма каротаж широкого распространения не имеет и в современных реалиях применяется крайне редко.

Однако, несмотря на преимущества статического зондирования перед тремя вышеописанными методами и возможность расчета параметра p по результатам статического зондирования, в действующей российской нормативной документации соответствующая методика не представлена. В статье рассмотрен зарубежный опыт вычисления плотности песков в зависимости от сопротивления конуса ненормализованного и нормализованного, муфты трения, порового давления; проведено сравнение зарубежных и отечественных методик, сделаны выводы о их применимости.

Ключевые слова: плотность песков; удельный вес песков; водонасыщенные пески; статическое зондирование, CPT, CPTU.

Для цитирования: Арапов А.Г., Моргунов Д.В., Надергулова Д.Р., Замалутдинова Ю.М. Сравнительный анализ зарубежных и отечественных методик расчета плотности песков по результатам статического зондирования // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 2. С. 206–212. DOI: 10.34753/HS.2025.7.2.206.

Comparative Analysis of International and Russian Methods for Calculating Sand Density Based on Static Cone Penetration Test Data

Aleksei G. Arapov [1], Dmitry M. Morgunov [1], Dianna R. Nadergulova [2], Yulia M. Zamalutdinova [3]
[1] LLC "MP "EnergoInvest", Tyumen, Russia; [2] LLC "Geosfera", Nizhnevartovsk, Russia; [3] LLC NIPI "Neftegasproektexpertiza", Tyumen, Russia
e-mail: arapovgeo@gmail.com

Abstract. The determination of sand density is most commonly performed using the cutting ring method and the volume replacement method. However, the applicability of these techniques is constrained by factors such as depth of occurrence, depositional genesis, and the degree of soil saturation. Consequently, static cone penetration testing can be regarded as a more universal and practically accessible approach, providing sufficient accuracy for engineering applications.

In this study, the methodologies proposed by P.K. Robertson, P.W. Mayne, J. Peuchen and D. Bouwmeester, and L.G. Mariupolsky were examined. The analysis revealed that the formulas developed by P.K. Robertson and P.W. Mayne yield considerable discrepancies in estimating sand density (p) when $R_f < 0.6$ %. Conversely, for $R_f > 0.6$ %, the computed density values tend to converge. The approach suggested by L.G. Mariupolsky provides intermediate results and is recommended for practical implementation.

Keywords: sand density; water-saturated sands; static penetration testing; piezocone penetration test; CPT; CPTU.

For citation: Arapov A.G., Morgunov D.M., Nadergulova D.R., Zamalutdinova Y. M. Comparative analysis of international and Russian methods for calculating sand density based on static cone penetration test data. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 2, pp. 206–212. DOI: 10.34753/HS. 2025.7.2.206. (In Russian; abstract in English).

Введение

Одним из наиболее ярких представителей зарубежной инженерной школы, занимающийся корреляцией плотности грунта *(p)* и *qt* является P.K. Robertson — почетный профессор, посвятивший более 40 лет изучению натурных испытаний грунтов, сейсмостойкого проектирования геотехнических сооружений, разжижения грунтов, проектирования свай и взаимодействия грунта с конструкцией. Графическим результатом его работ является так называемая диаграмма Робертсона, где по оси Y нанесены значения лобового сопротивления (*qt*), а по X — коэффициент трения или, как его еще называют, фрикционное отношение (*Rf*). Диаграмма поделена на области, каждой из которой соответствует определенный вид и подвид грунта. Но в данной статье речь пойдет не о классификации грунтов, а о расчете их плотности (*p*). И именно, о плотности (*p*) песчаных грунтов, отбор монолитов [1] из которых крайне затруднителен [2].

Другие исследователи, такие как P.W. Mayne — почетный профессор Технологического института Джорджии (США) и J. Peuchen, D. Bouwmeester (Fugro N.V., Лейдсендам, Нидерланды) также будут рассмотрены в рамках данной статьи.

В качестве сравнительной отечественной методики, будет использован вариант, предложенный Л. Г. Мариупольским [2].

Методы

Для расчетов при написания данной статьи, использовалась программа «СТЗ-3.1», ранее созданная А.Г. Араповым под операционные системы Windows, способная, в том числе, определять тип грунта по загруженным исходным данным статического зондирования в соответствии с классификацией Робертсона и рассчитывать плотность, а также некоторые другие параметры.

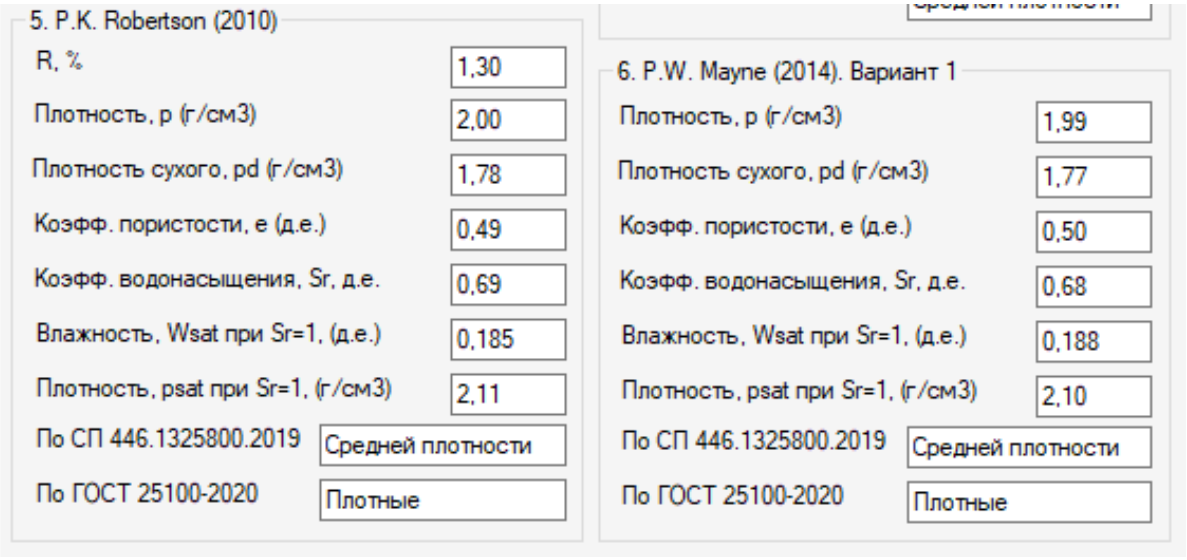

Рисунок 1. Вид одного из окон программы СТЗ-3.1
Figure 1. Screenshot of one of the windows of the STZ-3.1 software

Основным компонентом для расчета удельного веса (*y*) песчаных грунтов по Робертсону, является коэффициент трения (*Rf*) [3], вычисленный им на основе работ H.K.S.Ph. Begemann [4].

$$Rf = fs/(qt) * 100 \quad (1)$$

где *Rf* – коэффициент трения, %;

fs – сопротивление грунта на боковой поверхности зонда (муфте трения), кПа;

qt – нормализованное лобовое сопротивление грунта зонду (на конусе), кПа;

100 – используется для перевода в проценты.

Исходная формула Робертсона для расчета удельного веса (*y*) глинистых и песчаных грунтов [5] выглядит так:

$$y = yw[0{,}27 * [log10Rf] + \\ +0{,}36 * [log10(\frac{qt}{pa})] + 1{,}236] \quad (2)$$

где *y* – удельный вес грунта, кН/м^3;

pa – атмосферное давление в тех же единицах измерения, что и *qt;*

yw – удельный вес воды в тех же единицах измерения, что и *y.*

Однако, как следует из формулы (2), для расчета *qt* потребуются специальные зонды статического зондирования (СРТ) — CPTU (Piezocone Penetration Test), способные измерять поровое давление [5]:

$$qt = qc + u2 * (1 - a) \quad (3)$$

где *u2* – давление воды у основания муфты трения, МПа;

qc – ненормализованное лобовое сопротивление грунта зонду (на конусе), МПа;

a – это отношение площади датчика (мембраны), на который действует поровое давление к общей площади основания конуса зонда (типичные значения — 0,7 или 0,85. Могут отличаться в зависимости о производителя оборудования).

Но на текущий момент, подобные зонды в Российской Федерации, пока еще не получили широкого распространения. Тем не менее известно, что поровое давление в песчаных грунтах, в том числе и водонасыщенных, по условному допущению считается равным 0, а значит и *qt=qc* [5].

Таким образом, можно использовать стандартные тензометрические СРТ зонды (Cone Penetration Test), скорректировать формулу, а также перевести значения в единообразные единицы измерения так как в большинстве современной отечественной литературы и технических отчетах по результатам инженерно-геологических изысканий, зачастую используется понятие плотности грунта (*p*), а не удельного веса (*y*). Сопротивление же конусу (*qc*) и муфте (*fs*) регистрируется в МПа и кПа соответственно.

$$Rf = fs/(qc * 1000) * 100 \quad (4)$$

где *qc* в МПа;

1000 – используется для перевода единиц измерения *qc* из МПа в кПа.

$$p = 1 * [0{,}27 * [log10Rf] + \\ +0{,}36 * [log10(\frac{qc}{0{,}1})] + 1{,}236 \quad (5)$$

где *p* – в г/см^3;

0,1 – это среднее атмосферное давление в МПа, равное приблизительно 760 мм. рт. ст.;

1 – примерная плотность воды, г/см^3;

qc – в МПа.

Другой способ оценки удельного веса (*y*) песчаных, глинистых грунтов и илов предложен P.W. Mayne. За основу взято сопротивление грунта муфте трения (*fs*) [8]. На основании многочисленных испытаний различных типов грунтов была определена следующая зависимость:

$$y = 26 - \frac{14}{1 + [0{,}5 * log10(fs + 1)]^2} \quad (6)$$

Переведем формулу в единицы измерения плотности (*p*), разделив получившийся результат на ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с^2:

$$p = (26 - \frac{14}{1 + [0{,}5 * log10(fs + 1)]^2})/9{,}81 \quad (7)$$

Вторая зависимость, уже более упрощенная, с использованием натурального логарифма, предложенная P.W. Mayne [8] по той же выборке, что и предыдущая, выглядит так:

$$y = 12 + 1{,}5 * ln(fs + 1) \quad (8)$$

Переведя результат в г/см^3, получим:

$$p = (12 + 1.5 * ln(fs + 0{,}1))/9{,}81 \quad (9)$$

Следует учитывать, что ожидаемое отклонение в расчете плотности (*p*) при этом составляет ± 1,5 г/см^3.

Еще один вариант расчета удельного веса грунта (y) — совместное исследование P.W. Mayne, J. Peuchen и D. Bouwmeester. Помимо qt и fs был предложен новый, ключевой параметр — глубина залегания грунта (z) [7]. Исходная формула выглядит так:

$$y = 11{,}46 + 0{,}33 * \log(z) + \\ +3{,}10 * log(fs) + 0.70 * log(qt) \quad (10)$$

где, qt и fs в кПа;

z – глубина погружения зонда, м;

Формула расчета плотности (p) песчаных грунтов при этом будет:

$$p = (11{,}46 + 0{,}33 * \log(z) + \\ +3{,}10 * log(fs) + 0.70 * log(qc))/9{,}81 \quad (11)$$

Для проведения сравнительного анализа, используем так же методику Л. Г. Мариупольского [2].

$$p = \frac{ps(1+W)}{1{,}765 - 0{,}185\lg(\frac{qc}{1})} \quad (12)$$

где W – влажность грунта, д.е.;

ps – плотность частиц грунта, г/см^3.

Результаты

В Таблице 1 приведены значения qc и fs по аллювиальным пескам влажным, различной крупности и плотности в соответствии с классификацией СП 446.1325800.2019[1] и ГОСТ 25100-2020[2], вскрытыми юго-западнее г. Губкинский, вдоль левого берега р. Пякупур. Испытания статическим зондированием проведены зондами II типа — А3/350 производства АО «Геотест». Рассчитан Rf по формуле (4).

Результаты расчета плотностей (p) по данным из таблицы 1 приведены в таблице 2. Влажность (W) для формулы (12) условно принята равной 0,127 д.е., ps = 2,65 г/см^3.

Таблица 1. Средние значения qc, fs и Rf по пескам, вскрытым вдоль левого берега р. Пякупур
Table 1. Average values of qc, fs, and Rf for sands encountered along the left bank of the Pyakupur River

Пески	Средней крупности			Мелкие			Пылеватые		
	qc, МПа	fs, кПа	Rf, %	qc, МПа	fs, кПа	Rf, %	qc, МПа	fs, кПа	Rf, %
Плотные	23,9	39	0,16	17,6	53	0,30	12,0	132	1,10
Средней плотности	13,5	26	0,19	8,0	33	0,41	9,8	66	0,67
Рыхлые	4,7	3	0,06	3,4	12	0,35	2,4	20	0,83

Таблица 2. Расчетные значения плотностей (p) песков, вскрытых вдоль левого берега р. Пякупур
Table 2. Calculated density values (p) of sands encountered along the left bank of the Pyakupur River

Пески	Средней крупности				Мелкие				Пылеватые			
	(5)	(7)	(9)	(12)	(5)	(7)	(9)	(12)	(5)	(7)	(9)	(12)
	p, г/см3											
Плотные	2,30	1,78	1,79	1,98	2,19	1,84	1,83	1,95	2,00	1,98	1,97	1,91
Средней плотности	2,20	1,71	1,73	1,92	2,02	1,75	1,76	1,87	2,00	1,87	1,87	1,89
Рыхлые	2,16	1,34	1,44	1,82	1,91	1,56	1,62	1,79	1,75	1,66	1,69	1,76

Примечание к Таблице 2. (5), (7), (9), (12) – порядковые номера формул, по которым производился расчет

Как можно отметить, в результатах расчета по Робертсону (формула 5), плотность (p) несколько выше, чем по остальным зависимостям. Исключением является только

[1] СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ (с Изменением №1).

[2] ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация

песок пылеватый, в котором разница значений сопротивления по конусу и муфте менее выраженная, а соответственно и коэффициент трения (*Rf*) больше.

Чтобы разобраться в этом более основательно, построена диаграмма зависимости *p* от *Rf*, выбрав для примера значение по конусу 10 МПа, а по муфте от 10 кПа с шагом 5 кПа, для имитации роста *Rf* от 0,1 до 1,5 %.

На данном примере видно, что существенное различие в расчетах плотности (*p*) между формулами (5) и (7, 9) заметно только при *Rf*<0,6 %. А при *Rf*>0,6 % результаты уже более близкие. От *Rf*>=1 % график начинает выравниваться.

Для подтверждения полученных выводов, построена вторая диаграмма, где по оси Y расположены значения плотности (*p*) из таблицы 2, а по X — порядковые номера определений для наглядности.

Диаграмма показывает, что значения в пылеватом песке, имеющим *Rf*>0,6 % очень близки друг к другу.

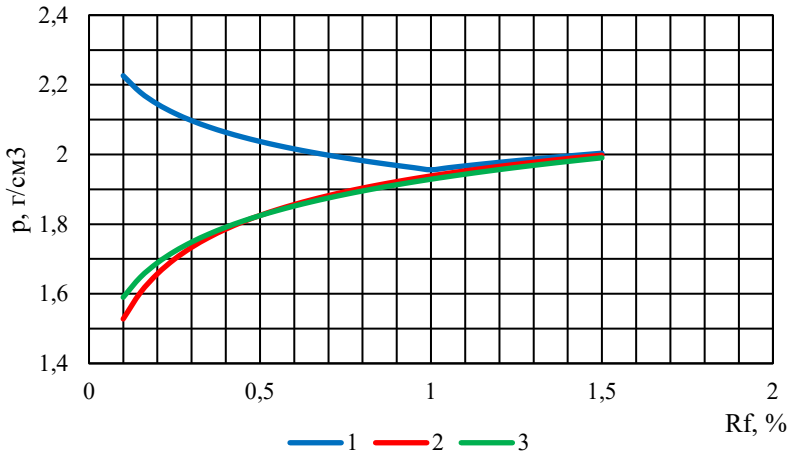

Рисунок 2. Сопоставление методик расчета плотности (*p*) в зависимости от *Rf*, расчет по: 1 – P.K. Robertson (формула 5), 2 – P.W. Mayne (формула 7), 3 – P.W. Mayne (формула 9)

Figure 2. Comparison of methods for calculating density (*p*) as a function of Rf, calculated according to: 1 – P.K. Robertson (Equation 5), 2 – P.W. Mayne (Equation 7), 3 – P.W. Mayne (Equation 9)

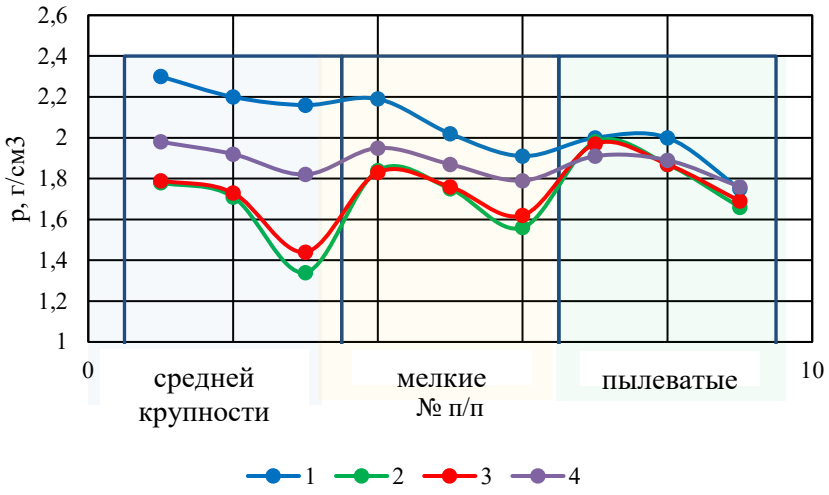

Рисунок 3. Сопоставление методик расчета плотности (*p*) по результатам Таблицы 2, расчет по: 1 – P.K. Robertson (формула 5), 2 – P.W. Mayne (формула 7), 3 – P.W. Mayne (формула 9), 4 – по Л.Г. Мариупольскому (формула 12)

Figure 3. Comparison of methods for calculating density (*p*) based on the results of Table 2, calculated according to: 1 – P.K. Robertson (Equation 5), 2 – P.W. Mayne (Equation 7), 3 – P.W. Mayne (Equation 9), 4 – L.G. Mariupolsky (Equation 12)

Все вышеописанные методы расчета плотности (p) справедливы для песков, расположенных выше уровня грунтовых вод (УГВ), так как в некоторых случаях, рассчитав по полученным значениям p коэффициент водонасыщения (Sr), он может получиться более 1.

Поэтому, для определения плотности песка в водонасыщенном состоянии, предлагается метод обратного перерасчета [9], условно допустив, что коэффициент водонасыщения (Sr) в таких грунтах равен 1 и не превышает это значение [10].

$$pd = \frac{p}{(1+W)} \quad (13)$$

где pd – плотность сухого грунта, г/см^3;

W – в данном случае не обязательно должна точно соответствовать природной.

$$Wsat = \left(\frac{1}{pd} - \frac{1}{ps}\right) * 1 \quad (14)$$

где $Wsat$ – влажность грунта при $Sr=1$, д.е.

$$psat = (1 + Wsat) * pd \quad (15)$$

где $psat$ – плотность при $Sr=1$, г/см^3.

Заключение

Формулы Робертсона (5) и Мейна (7, 9) для песков с Rf<0,6 % имеют расхождения в результатах расчетах плотности (p), значительно увеличивающиеся с уменьшением Rf и применение их в отчетах по инженерно-геологическим изысканиям, в данных границах, требует осторожности.

Формулы Робертсона (5) и Мейна (7), (9) имеют близкие результаты расчета p при Rf>0,6 %.

Для расчетов p рекомендуется использовать формулу Мариупольского (12), как среднее, между формулами (5 и 7, 9).

Требуется дополнительное изучение вопроса на большей выборке результатов статического зондирования.

Литература / References

1. Ломтадзе В.Д. Словарь по инженерной геологии. Санкт-Петербург, 1999 г. 360 с.
2. Мариупольский Л.Г. Исследования грунтов для проектирования и строительства свайных фундаментов. Москва, Стройиздат, 1989 г. 199 с.
3. Robertson. P.K. Soil Behaviour Type from the CPT: an update. Gregg Drilling & Testing Inc., Signal Hill, California, USA, 2010, 8 p.
4. Begemann H.K.S.Ph. The Friction Jacket Cone as an Aid in Determining the Soil Profile. ICSMFE, 1965, 5 p.
5. Robertson P.K., Cabal K.L. Guide to Cone Penetration Testing. Seventh edition, 2022, 138 p.
6. Robertson P.K., Cabal K.L. Estimating soil unit weight from CPT. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 2010, 8 p.
7. Mayne P.W., Peuchen J., Bouwmeester D. Soil unit weight estimation from CPTs. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 2010, 8 p.
8. Mayne P.W. Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA, 2014, 28 p.
9. Арапов А.Г., Надергулова Д.Р., Замалутдинова Ю.М. Проблематика определения природной плотности аллювиальных водонасыщенных песков // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 6. Вып. 3. С. 266–273. DOI: 10.34753/HS.2024.6.3.266.
   Arapov A.G., Nadergulova D. R., Zamalutdinova Yu. M. Methodological Issues in Natural Density Determination of Water-Saturated Alluvial Sands. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2024, vol. 6, iss. 3, pp. 266−271. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS. 2024.6.3.266.10.
10. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. Москва, 1968 г. 632 с.

Поступила в редакцию / Received 26.09.2025
Принята к публикации / Accepted 16.10.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Арапов Алексей Григорьевич, главный специалист, УКИИ ОИИ ООО «МП «ЭнергоИнвест», г. Тюмень, Россия, SPIN-код: 8202-2310, https://orcid.org/0009-0000-0737-8792, arapovgeo@gmail.com

Моргунов Дмитрий Владимирович, директор, ООО «МП «ЭнергоИнвест», г. Тюмень, Россия, https://orcid.org/0009-0001-9805-8694, morgunov@eninvest.ru

Надергулова Дианна Рамильевна, главный специалист, ООО «Геосфера», г. Нижневартовск, Россия, https://orcid.org/0009-0000-0253-4522, drnadergulova@nvgeosfera.ru

Замалутдинова Юлия Минзаитовна, ведущий инженер, ООО НИПИ «Нефтегазпроектэкспертиза», г. Тюмень, Россия, https://orcid.org/0009-0006-3673-4972, memorydisease@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei G. Arapov, senior specialist, UKII OII LLC "MP "EnergoInvest", Tyumen, Russia, SPIN-code: 8202-2310, https://orcid.org/0009-0000-0737-8792, arapovgeo@gmail.com

Dmitry V. Morgunov, CEO, LLC "MP "EnergoInvest", Tyumen, Russia, https://orcid.org/0009-0001-9805-8694, morgunov@eninvest.ru

Dianna R. Nadergulova, senior specialist, LLC "Geosfera", Nizhnevartovsk, Russia, https://orcid.org/0009-0000-0253-4522, drnadergulova@nvgeosfera.ru

Yulia M. Zamalutdinova, leading engineer, LLC NIPI "Neftegasproektexpertiza", Tyumen, Russia, https://orcid.org/0009-0006-3673-4972, memorydisease@mail.ru