

**Д.В.ГРИШИН**, начальник управления, *ns@gtn.ltg.gazprom.ru*

*Ленинградское управление подземного хранения газа ООО «Газпром ПХГ»*

**А.В.ПЕТУХОВ**, д-р геол.-минерал. наук, профессор, *Petukhov@spmi.ru; AV\_Petukhov@mail.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

**А.А.ПЕТУХОВ**, мастер по исследованию скважин, *A.Petukhov@gtn.ltg.gazprom.ru;*

*alexey2096@mail.ru*

*Ленинградское управление подземного хранения газа ООО «Газпром ПХГ»*

**D.V.GRISHIN**, head of board, *ns@gtn.ltg.gazprom.ru*

*Leningrad Board of Gazprom underground gas storage of «Gazprom PHG»*

**A.V.PETUKHOV**, Dr. in geol. & min. sc., professor, *Petukhov@spmi.ru; AV\_Petukhov@mail.ru*

*Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)*

**A.A.PETUKHOV**, foreman, *A.Petukhov@gtn.ltg.gazprom.ru; alexey2096@mail.ru*

*Leningrad Board of underground gas storage of «Gazprom PHG»*

## **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИХ ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ ПРИЗАБОЙНЫХ ЗОН СКВАЖИН ГАТЧИНСКОГО ПХГ, И ПРОГНОЗ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЙ**

Исследованы особенности распределения упругих напряжений в призабойных зонах скважин Гатчинского подземного хранилища газа. Показано, что при депрессии более 1,5 МПа вмещающие породы начинают разрушаться. На основе изучения корреляционных зависимостей между технологическими параметрами работы скважин и выносом песка построены уравнения множественной регрессии, которые используются для прогноза объемов выноса песка на каждой работающей скважине.

**Ключевые слова:** касательное напряжение, открытый ствол скважины, подземное хранилище газа, депрессия, корреляция, песок, регрессия, прогноз.

## **THE ANALYSIS OF FACTORS, THAT CAUSE PROCESSES OF OPEN HOLE WELLS' DESTRUCTIONS OF GATCHINA UNDERGROUND GAS STORAGE RESERVOIR AND PREDICTION OF SAND EFFECTS**

The peculiarities of elastic stresses in open hole wells' of Gatchina gas storage reservoir are researched. It is revealed that in depression more than 1,5 MPa gas bearing rocks start to destroy. On the basis of studying of correlation relation between technological parameters of gas wells' production and evacuation of sand the equations of plural regression are constructed. These equations are used to make prediction of sand evacuation at each producing gas well.

**Key words:** tangential stress, well's open hole, underground gas storage reservoir, depression, correlation, sand, regression, prediction.

Разрушение призабойной зоны пласта (ПЗП) является характерным осложнением скважин при эксплуатации подземных газовых хранилищ (ПХГ). Это явление вызвано ростом нагрузки на скелет породы-коллектора при создании депрессии и снижении пластового давления в процессе отборов газа,

приводящей к концентрации избыточных напряжений в ПЗП. Распределение избыточных напряжений в ПЗП неравномерно, поэтому существуют зоны максимальной концентрации этих напряжений, которые вероятно и являются очагами наиболее интенсивного разрушения пород. Для изучения механизма

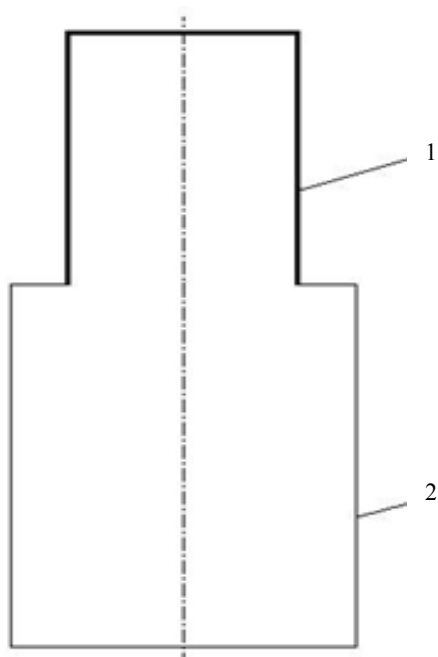


Рис.1. Схематическое изображение конструкции нижней части скважин ПХГ  
1 – обсадная колонна; 2 – открытый ствол скважины

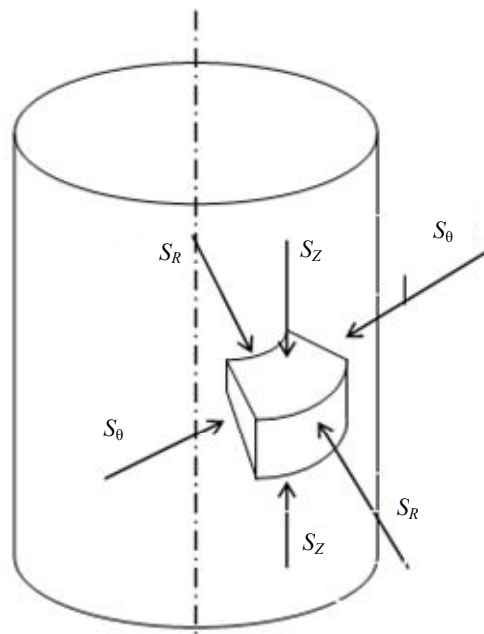


Рис.2. Напряжения, действующие в ПЗП необсаженной скважины

развития процессов разрушения газонасыщенных песчаников и возможного предотвращения выноса песка при эксплуатации скважин Гатчинского ПХГ необходим анализ особенностей распределения напряжений в ПЗП. Для проведения анализа напряженно-деформированного состояния пород в ПЗП обсаженных скважин газовых месторождений при снижении пластового давления исследователи обычно пользуются методами математического моделирования и численного анализа уравнений упругого равновесия горной породы, используя методы решения плоских (двумерных) задач распределения напряжений в ПЗП [2-4]. Однако призабойная зона пласта скважин ПХГ обустроена специальным образом. При этом скважины на ПХГ обсажены только до кровли проницаемого пласта, а диаметр нижней части ствола увеличен для дальнейшего заполнения ПЗП песчано-гравийной смесью (рис.1). Поэтому если анализировать распределение напряжений в ПЗП скважин на ПХГ необходимо рассматривать открытый (необсаженный) ствол скважины. Напряжения, возник-

ающие в ПЗП необсаженного ствола скважины, в теории упругости определяются хорошо известным решением задачи Ламэ для цилиндрической полости, находящейся под действием всестороннего сжатия внешним давлением и внутреннего давления заполняющей ее жидкости [1]. На рис.2 схематично показан участок необсаженного ствола скважины и действующие в ее окрестности радиальное  $S_R$ , кольцевое (тангенциальное)  $S_\theta$  и вертикальное  $S_z$  напряжения в скелете породы. В соответствии с такой схемой в проницаемых горных породах нормальные напряжения, действующие в скелете породы (эффективные напряжения), представляют собой разность между полными напряжениями, действующими на рассматриваемую площадку, и давлением жидкости в данной точке:  $S_n = \sigma_n + p$ , где  $S_n, \sigma_n < 0$ ;  $p > 0$ .

Объектом хранения газа Гатчинского ПХГ является водоносный пласт (I гдовский пласт), залегающий на глубине около 400 м. Представлен I пласт песчаниками, участками слабосцементированными, разнозернистыми, иногда крупно- и грубозернистыми,

кварцево-полевошпатовыми. Толщина пласта 5-11 м, пористость песчаников в среднем 22 %, проницаемость на отдельных участках достигает 2-4 дарси. Покрышкой пласта-коллектора служит 4-5-метровая однородная пачка глин, прослеживающаяся по площади повсеместно. Песчаники I гдовского пласта насыщены хлоридно-натриевыми пластовыми водами общей минерализацией 5-13 г/л, удельным весом 1,008 г/см<sup>3</sup>.

В процессе создания депрессии для отбора газа и постепенном уменьшении пластового давления нагрузка на стенке скважины вдоль оси, соответствующей тангенциальному направлению, значительно увеличивается при сохранении напряжений в направлении двух других осей. При небольших депрессиях песчаники Гатчинского ПХГ деформируются упруго. При этом проницаемость пород за счет упругой деформации может несколько уменьшаться, но обратимо. Это продолжается до тех пор, пока упругая деформация песчаников (при увеличении депрессии) не достигнет некоторой критической величины, после чего начинается неупругое деформирование породы. Именно в этот момент порода начинает растрескиваться и разрушаться. Это явление сопровождается резким увеличением проницаемости песчаников в ПЗП даже по сравнению с первоначальным значением.

Величина депрессии, при которой начинается неупругое деформирование породы при неизменной нагрузке (ползучести), зависит от литологического типа породы, ее прочности, гранулометрического состава песчаников, условий их залегания, пластового давления и других факторов. В соответствии с инженерно-геологической классификацией горных пород по Саваренскому – Ломтадзе песчаники I гдовского пласта Гатчинского ПХГ относятся к II группе. Это относительно твердые горные породы, выветрелые и в различной степени трещиноватые. Сопротивление сжатию ( $R_{сж}$ ) таких пород изменяется от 1,5 до 50 МПа. Таким образом, уже при депрессии более 1,5 МПа пес-

чаники в ПЗП скважин Гатчинского ПХГ могут испытывать неупругую деформацию и подвергаться разрушению. Характер разрушения песчаников в процессе эксплуатации скважин различен. В более плотных, прочно цементированных среднезернистых песчаниках, разрушение происходит путем образования нескольких макротрещин. Менее прочные, слабо цементированные крупно- и грубозернистые песчаники дезинтегрируются и практически превращаются в песок.

Единственным возможным решением для предотвращения разрушения песчаников и выноса песка в процессе эксплуатации скважин ПХГ является разгрузка породы в ПЗП от действующих в ней касательных напряжений. В частности, для открытого ствола скважин Гатчинского ПХГ это сводится к уменьшению действующих в ПЗП кольцевых (тангенциальных) напряжений (рис.2). В связи с тем, что максимальные касательные напряжения в рассматриваемом случае равны половине разности тангенциальных  $S_{\theta}$  и радиальных  $S_R$  напряжений, а радиальные напряжения определяются высотой (давлением) столба жидкости в скважине и относительно невелики, основное внимание должно быть уделено снятию действующих кольцевых напряжений  $S_{\theta}$ . На практике этого можно достичь несколькими путями: изменением (сглаживанием) формы верхней части открытого ствола [4], нарезанием вертикальных щелей в открытом стволе скважины, либо ограничением депрессии и уменьшением отборов газа в скважинах. Для реализации первого и второго способов необходимо проводить капитальный ремонт скважин, поэтому на практике для предотвращения выноса песка обычно снижают депрессию и уменьшают объемы отбора газа.

При проведении анализа пескопроявлений в пределах Гатчинского ПХГ были выбраны скважины с высокими показателями выноса песка, в среднем более 1000 см<sup>3</sup> в год за последние семь циклов отбора газа. Для выявления связей между параметрами

Таблица 1

## Коэффициенты корреляции между объемом выноса песка и некоторыми эксплуатационными параметрами скважин

Номер скважины	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и временем работы скважины	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и отбором газа из скважины	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и отбором воды из скважины	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и количеством дней работы скважины	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и отбором газа из района исследуемых скважин	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и отбором газа на сборном пункте	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и закачкой газа в скважину	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и количеством дней закачки газа	Коэффициент корреляции между объемами выноса песка и газа, закаченного в районе исследования скважин	Коэффициент корреляции между объемами выноса песка и газа, закаченного на СП	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и средней скоростью отбора газа в скважине	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и скоростью отбора газа в районе исследования скважин	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и средней скоростью отбора газа на сборном пункте	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и средней скоростью закачки газа в скважине	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и средней скоростью закачки газа в районе исследования скважин	Коэффициент корреляции между объемом выноса песка и средней скоростью закачки газа на сборном пункте
176	0,55	0,84	0,88	0,82	-0,04	0,22	-0,28	0,02	-0,02	0,20	-0,19	-0,77	-0,77	-0,24	-0,06	-0,01
117	0,67	-0,63	-0,44	-0,10	0,29	-0,71	-0,28	0,35	0,45	-0,73	-0,38	0,19	-0,02	-0,34	0,22	-0,54
51	0,56	-0,52	0,20	-0,18	-0,36	-0,37	0,04	0,02	-0,85	-0,61	-	-0,89	-0,75	0,026	-0,531	-0,272
50	0,65	-0,58	-0,11	-0,06	-0,09	0,11	-0,24	-0,29	0,00	0,13	0,66	0,21	-0,09	0,17	0,28	0,31
150	0,80	-0,83	-0,34	-0,78	-0,70	-0,54	-0,45	0,47	-0,61	-0,54	-0,02	0,76	0,78	-0,55	-0,55	-0,51
52	0,39	0,45	-0,20	0,45	-0,05	-0,82	-0,90	0,09	0,04	-0,78	-0,89	-0,15	-0,52	-0,63	-0,17	-0,24
100	0,45	0,39	-0,14	0,47	-0,02	-0,90	0,09	0,48	0,13	-0,83	0,55	-0,39	-0,33	-0,39	-0,50	-0,51
118	0,30	0,23	0,87	0,64	0,85	0,35	0,64	-0,72	0,60	0,48	0,45	0,86	-0,32	0,71	0,91	0,74
138	0,00	-0,48	0,00	-0,47	-	0,14	0,20	0,65	-	0,02	0,66	-	-0,22	-0,03	-	-0,79
135	0,14	-0,68	-0,49	-0,33	-	0,13	-0,45	-0,26	-	-0,76	-0,41	-	0,56	-0,38	-	-0,168

работы эксплуатационных скважин и объемами выносимого песка были рассчитаны линейные коэффициенты корреляции между различными параметрами. Результаты расчетов приведены в табл.1. Из таблицы видно, что существует довольно тесная линейная корреляционная зависимость между объемами выноса песка и следующими параметрами: отбор газа из скважины за цикл, объем воды, отобранной из скважины за цикл, отбор газа на участке ПХГ за цикл, объем закачки газа в скважину за цикл, скорость отбора газа из скважины за цикл и др.

На основании установленных корреляционных зависимостей между выносом песка и определенными параметрами работы скважин для прогноза объемов выноса песка были построены уравнения множественной регрессии для каждой работающей скважины.

При линейной зависимости уравнение множественной регрессии имеет вид  $Y_x = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$ , где  $X_i$  –  $i$ -й факторный признак;  $Y_x$  – результативный показатель (объем выноса песка);  $a_0$  – свободный параметр уравнения;  $a_i$  – коэффициент при  $i$ -м факторном признаке.

Пример построения графика зависимости объема выноса песка от времени на основе уравнения регрессии для скважины № 118 представлен на рис.3. Исходные данные для подбора коэффициентов представлены в табл.2.

На рис.4 показаны варианты рассчитанных кривых регрессии, учитывающих различные параметры работы скважин. Из рисунка видно, что наиболее точно на искомую кривую 1 ложится кривая 2, которая характеризуется самым высоким коэффициентом детерминации –  $R^2 = 0,966$ . Таким образом, параметры работы скважины (факторы), входящие в уравнение регрессии, на 96 % предопределяют объемы выносимого песка.

Данное уравнение регрессии имеет вид

$$Y_x = 6800 + 0,516X_1 + 0,109X_2 - 167X_3,$$

где  $Y_x$  – объем выноса песка;  $X_1$  – объем отборов газа в районе скважины № 3 в исследуемом

цикле, тыс.м<sup>3</sup>,  $X_2$  – объем закачки газа в районе скважины № 3 в исследуемом цикле, тыс.м<sup>3</sup>,  $X_3$  – количество дней закачки газа в исследуемом цикле.

Следует отметить, что при многофакторном анализе для характеристики тесноты связи также обычно рассчитывают частные коэффициенты эластичности по формуле

$$\mathcal{E}_i = a_i X_{i\text{cp}} / Y_{\text{cp}},$$

где  $X_{i\text{cp}}$  – среднее значение  $i$ -го фактора;  $a_i$  – коэффициент регрессии при  $i$ -м факторе;  $Y_{\text{cp}}$  – среднее значение изучаемого показателя.

Рассчитаны частные коэффициенты эластичности для различных параметров работы скважины № 117 (зависимый фактор – вынос песка): отбор газа – 3 млн м<sup>3</sup>; закачка газа в скважину – 5 млн м<sup>3</sup>; закачка – 1 день; среднесуточный отбор – 3млн м<sup>3</sup>/день.

По результатам проведенного анализа работы десяти эксплуатационных скважин Гатчинского ПХГ были установлены тесные корреляционные зависимости между объемами выносимого песка и определенными технологическими параметрами работы скважин. Наличие выявленных корреляционных связей позволяет построить уравнение регрессии для каждой из работающих скважин и прогнозировать объемы выносимого песка на все последующие циклы отбора газа из скважин Гатчинского ПХГ. Нахождение коэффициентов уравнения регрессии для каждой скважины выполняется в оперативном автоматизированном режиме и не требует много времени при наличии подробных промысловых данных о работе скважин. Полученные уравнения регрессии для каждой скважины используются при планировании объемов отбора и закачки газа в текущем цикле, для обоснования количества продувок шлейфов, для составления графиков вскрытия породоуловителей на устьях скважин, а также для выявления первоочередных скважин, нуждающихся в обследовании и последующем подземном или капитальном ремонте.

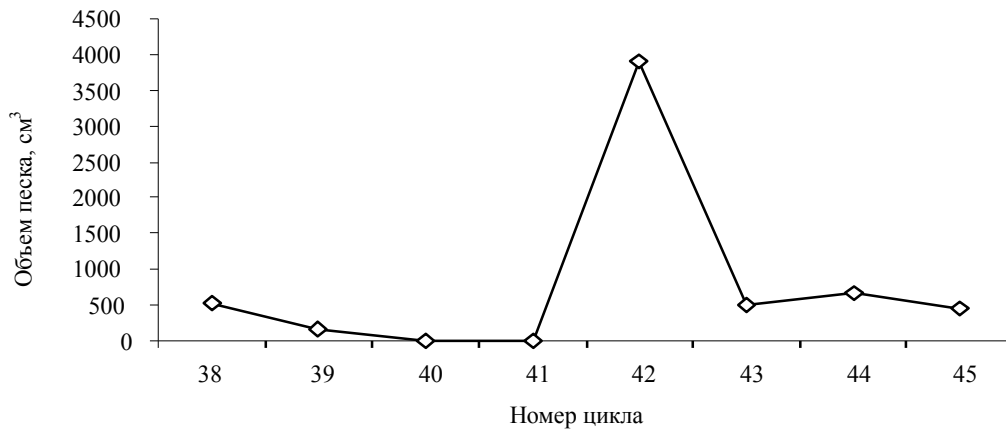


Рис.3. Зависимость объема отобранного песка от времени по скважине № 118

Таблица 2

Исходные данные для расчетов по скважине № 118

Годы	Отбор газа, тыс.м³	Отбор воды, м³	Отбор песка, см³	Количество дней работы	Отбор газа в исследуемом районе, тыс.м³	Отбор газа на участке СП-4, тыс.м³	Закачка газа в скважину, тыс.м³	Количество дней закачки	Закачка газа в исследуемом районе тыс.м³	Закачка газа на участке СП-4, тыс.м³
2000-2001	9410	3549	515	162	22240	113865				
2001-2002	9900	3280	160	147	22525	113985	7700	131	31300	123230
2002-2003	10250	2200	0	174	23660	115220	7500	136	33410	124560
2003-2004	9360	3070	10	155	23220	113370	8550	131	33200	121700
2004-2005	9985	5940	3890	188	26905	117555	8820	125	36710	125585
2005-2006	9415	3050	510	179	24285	112735	7845	136	35475	121725
2006-2007	8810	3710	670	176	24766	107491	7400	138	36880	121260
2007-2008	9325	4508	460	171	23725	101765	8000	134	34740	117740

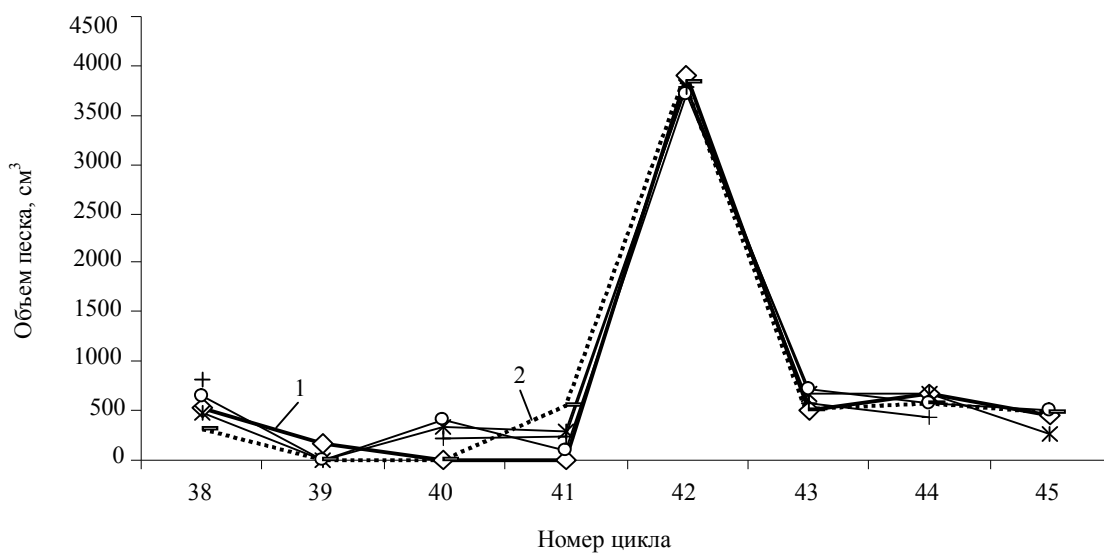


Рис.4. Графики вариантов уравнений множественной регрессии для скважины № 118

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 415 с.
2. *Свалов А.М.* Анализ факторов, обуславливающих процессы разрушения призабойной зоны добывающей скважины // Газовая промышленность. 2004. № 7. С.61-63.
3. *Свалов А.М.* Двумерный анализ особенностей распределения упругих напряжений в приствольных зонах скважин // Газовая промышленность. 2006. № 2. С.34-36.
4. *Свалов А.М.* Механизмы разрушения призабойных зон добывающих скважин на поздней стадии разработки газовых залежей / А.М.Свалов, В.Г.Григулецкий // Газовая промышленность. 2007. № 9. С.55-59.

## REFERENCES

1. *Lekhnitskiy S.G.* Theory of non homogeneous bodies' resilience. Moscow: Nauka, 1977. 415 p.
2. *Svalov A.M.* Analysis of factors, that cause processes of rocks' destruction in producing wells // Gazovaya promyshlennost. 2004. № 7. P.61-63.
3. *Svalov A.M.* Two-way analysis of peculiarities spreading'stangential strain near wells' hole // Gazovaya promyshlennost. 2006. № 2. P.34-36.
4. *Svalov A.M., Gryguletskiy V.G.* Mechanism of rocks' destruction near wells' hole on late stage of gas fields' development // Gazovaya promyshlennost. 2007. № 9. P.55-59.