

### Література

1. Необходимость обработки кавернозных зон скважин / А. Н. Давиденко, Б. Т. Ратов, А. А. Игнатов и др. // Промышленность Казахстана. – 2016. – Вып. 3 (96). – С. 63 – 68.
2. Игнатов А. А. Исследование параметров процесса удаления глинисто-шламовых образований из кавернозных зон скважин // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – Вып. 1(10). – С. 63 – 68.
3. Петров Л. Н., Супрунюк Н. Г. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с.
4. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин пород. – К.: Техника, 1989. – 177 с.

Надійшла 15.06.18

### References

1. Davidenko, A. N., Ratov, B. T., Ihnatov, A. A. et al. (2016). Neobkhdimost obrabotki kavernoznykh zon skvazhin [Necessity of treatment vuggy areas of bore holes]. *Promyshlennost Kazakhstana.–Industry of Kazakhstan, 3, 96, 63 – 68* [in Russian].
2. Ihnatov, A. A. Issledovanie parametrov processa udaleniia glinisto-shlamovykh obrazovaniy iz kavernoznykh zon skvazhin [Research into parameters characterizing the process of withdrawing clay-mud formations from bore hole vuggy zones]. *Mining of Mineral Deposits, 1, 10. – 63 – 68* [in Russian].
3. Petrov, L. N., & Supruniuk N. G. (1991). *Korrozionno-mekhanicheskoe razrushenie metallov i splavov [Corrosive-mechanical destruction of metals and alloys]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
4. Provolockii, A. E. (1989). *Struino-abrazivnaia obrabotka detalei mashin [Stream-abrasive treatment of details machines]*. Kiev: Tekhnika [in Russian].

УДК 622.24.051

**А. А. Кожевников**, д-р. техн. наук; **В. Л. Хоменко**, канд. техн. наук<sup>1</sup>; **Б. Т. Ратов**, д-р техн. наук, **А. Токтасынов**, **Е. Мусаев**, магистранты<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»,  
пр. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина e-mail: aak2@ua.fm

<sup>2</sup>Каспийский университет, (г.Алматы, Республика Казахстан), e-mail:ratov69@mail.ru

## МНОГОФАКТОРНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ СТЕНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ КРИОГЕННО-ГРАВИЙНОГО ФИЛЬТРА ПО СТВОЛУ СКВАЖИНЫ

Целью данной работы является анализ результатов стендовых исследований технологии транспортировки экспериментального образца криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины. Для этого был использован метод многофакторного регрессионного анализа линейной и экспоненциальной модели процесса спуска. В результате выполнения работы было установлено, что коэффициент детерминации линейной модели многофакторной регрессии равен 0,66. Экспоненциальная модель более достоверно, чем линейная позволяет аппроксимировать результаты исследований (коэффициент детерминации 0,835). В дальнейшем целесообразно провести многофакторный анализ, используя другие модели, например, полиномиальную, степенную, гиперболическую. Для повышения достоверности

результатов многофакторного регрессионного анализа необходимо проведение дополнительных стендовых исследований для уточнения влияния скорости спуска и температуры скважинной жидкости на максимально возможную глубину спуска. Найденная регрессионная модель позволяет спрогнозировать максимальную глубину спуска криогенно-гравийного фильтра при различных геолого-технических условиях. А это, в свою очередь, дает возможность оптимизировать конструкцию и технологию спуска фильтра.

**Ключевые слова:** криогенно-гравийный фильтр, транспортировка фильтра, многофакторный регрессионный анализ, буровая скважина.

### **Постановка проблемы**

На кафедре техники разведки месторождений полезных ископаемых Национального технического университета «Днепровская политехника» были проведены экспериментальные стендовые исследования технологии транспортировки криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины. В ходе проведения стендовых исследований изучалось влияние пяти факторов на максимально возможную глубину спуска фильтра, а именно : закрытый или открытый башмак фильтровой колонны, на которой фильтр спускается в скважину; скорость спуска фильтра  $V$ ; концентрация вяжущего (желатина)  $C$ ; длина криогенно-гравийного элемента (КГЭ)  $l_{кгэ}$ ; температура скважинной жидкости  $t$ . Более подробно параметры, влияющие на глубину спуска криогенно-гравийных фильтров, были проанализированы нами в работе [1]. Для выработки путей дальнейшего совершенствования криогенно-гравийных фильтров и прогнозирования длины спуска в различных условиях необходимо установить совместное влияние всех вышеперечисленных факторов.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Вопросы создания гравийных фильтров и их транспортировки на забой скважины исследовали А.Д. Башкатов, Д.Н. Башкатов, В.М. Гаврилко, Г.П. Квашнин и др. [2–5].

**Цель** настоящей статьи – провести многофакторный регрессионный анализ результатов стендовых исследований технологии транспортировки экспериментального образца криогенно-гравийного элемента фильтра по стволу скважины.

### **Основное содержание**

Методика и результаты стендовых исследований технологии транспортировки гравийной фильтра по стволу скважины приведены в [6]. Результаты экспериментов показали, что максимальная длина спуска фильтра больше в случае использования КГФ на фильтровой колонне с закрытым башмаком по сравнению с открытым. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 1. Кроме того в таблице приведены прогнозные значения глубины спуска фильтра при линейной и экспоненциальной модели множественной регрессии.

Таблица 1. Фактические и прогнозные результаты стендовых исследований технологии транспортировки экспериментального образца КГЭ фильтра на фильтровой колонне с закрытым башмаком

Скорость спуска V, м/с	Концентрация желатина С, %	Длина КГЭ L <sub>КГЭ</sub> , м	Температура скважинной жидкости. Т °С	Глубина спуска L, м	Прогнозная глубина спуска (линейная модель) L, м	Прогнозная глубина спуска (экспоненциальная модель) L, м
1	2	3	4	5	6	7
0,05	2	1	17	10,8	13,2	12,1
0,05	2	2	17	4,3	-10,3	7,1
0,05	2	3	17	4,3	-33,8	4,1
0,05	3,5	1	17	19,4	28,7	17,1
0,05	3,5	2	17	15,1	5,2	10,0
0,05	3,5	3	17	8,6	-18,3	5,8
0,05	5	1	17	30,2	44,3	24,1
0,05	5	2	17	21,6	20,8	14,1
0,05	5	3	17	10,8	-2,7	8,3
0,05	10	1	17	103,7	96,1	76,0
0,05	10	2	17	23,8	72,6	44,5
0,05	10	3	17	13	49,1	26,1
0,11	2	1	17	11	17,4	12,6
0,11	2	2	17	4,4	-6,1	7,4
0,11	2	3	17	4,4	-29,6	4,3
0,11	3,5	1	17	17,6	32,9	17,8
0,11	3,5	2	17	11	9,4	10,4
0,11	3,5	3	17	8,8	-14,1	6,1
0,11	5	1	17	33	48,5	25,1
0,11	5	2	17	15,4	25,0	14,7
0,11	5	3	17	11	1,5	8,6
0,11	10	1	17	154	100,3	79,1
0,11	10	2	17	110	76,8	46,3
0,11	10	3	17	13,2	53,3	27,1
0,22	2	1	17	6,6	25,0	13,5
0,22	2	2	17	4,4	1,5	7,9
0,22	2	3	17	4,4	-21,9	4,6
0,22	3,5	1	17	24,2	40,6	19,1
0,22	3,5	2	17	13,2	17,1	11,2
0,22	3,5	3	17	8,8	-6,4	6,6
0,22	5	1	17	17,6	56,1	27,0
0,22	5	2	17	15,4	32,6	15,8
0,22	5	3	17	11	9,1	9,3
0,22	10	1	17	176	107,9	85,2
0,22	10	2	17	33	84,5	49,9

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
0,22	10	3	17	13,2	61,0	29,2
0,05	2	1	5	17,3	35,2	25,9
0,05	2	2	5	15,1	11,7	15,2
0,05	2	3	5	10,8	-11,8	8,9
0,05	3,5	1	5	19,4	50,7	36,6
0,05	3,5	2	5	13	27,3	21,4
0,05	3,5	3	5	13	3,8	12,5
0,05	5	1	5	64,8	66,3	51,7
0,05	5	2	5	56,2	42,8	30,2
0,05	5	3	5	19,4	19,3	17,7
0,05	10	1	5	127,4	118,1	163,1
0,05	10	2	5	86,4	94,6	95,5
0,05	10	3	5	28,1	71,1	55,9
0,11	2	1	5	15,4	39,4	27,0
0,11	2	2	5	15,4	15,9	15,8
0,11	2	3	5	11	-7,6	9,3
0,11	3,5	1	5	28,6	54,9	38,1
0,11	3,5	2	5	22	31,4	22,3
0,11	3,5	3	5	24,2	7,9	13,1
0,11	5	1	5	77	70,5	53,8
0,11	5	2	5	44	47,0	31,5
0,11	5	3	5	26,4	23,5	18,4
0,11	10	1	5	167,2	122,3	169,8
0,11	10	2	5	125,4	98,8	99,4
0,11	10	3	5	33	75,3	58,2
0,22	2	1	5	17,6	47,1	29,1
0,22	2	2	5	13,2	23,6	17,0
0,22	2	3	5	8,8	0,1	10,0
0,22	3,5	1	5	37,4	62,6	41,0
0,22	3,5	2	5	28,6	39,1	24,0
0,22	3,5	3	5	15,4	15,6	14,1
0,22	5	1	5	92,4	78,1	57,9
0,22	5	2	5	55	54,7	33,9
0,22	5	3	5	33	31,2	19,9
0,22	10	1	5	231	130,0	182,8
0,22	10	2	5	149,6	106,5	107,0
0,22	10	3	5	37,4	83,0	62,7

Так же в работе [6] были сделаны выводы о линейной зависимости глубины спуска от скорости спуска, концентрации желатина (при концентрации более 5 %) и длины криогенно-гравийного элемента фильтра.

Исходя из этого, вначале нами решалась задача многофакторной корреляции для линейной модели. Для этого использовался Пакет анализа программы MicrosoftExcel.

Уравнение линейной множественной корреляции имеет вид:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

Результаты регрессионной статистики приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Регрессионная статистика**

Множественный R	0,8134
Коэффициент детерминации (R-квадрат)	0,6616
Нормированный R-квадрат	0,6414
Стандартная ошибка	28,5679
Наблюдения	72

Величина значения R-квадрат, которая составляет 0,6616; показывает, что достоверность аппроксимации, которая будет получена в результате регрессионного анализа относительно невысокая. Таким образом, для улучшения достоверности стоит кроме линейной, проанализировать и другие модели.

Результаты дисперсионного анализа приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Дисперсионный анализ**

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	4	106922,2	26730,56	32,75296	$3,97 \cdot 10^{-15}$
Остаток	67	54680,48	816,1266		
Итого	71	161602,7			

И, наконец, значения коэффициентов уравнения регрессии и их статистические характеристики приведены в табл. 4. В нижней части таблицы – результаты оценки регрессии: оценки МНК коэффициентов регрессии, оценки стандартных отклонений коэффициентов регрессии, t – статистики для проверки значимости коэффициентов регрессии, p-value для этих тестов, нижние и верхние границы 95% доверительных интервалов для оценок коэффициентов регрессии.

**Таблица 4. Коэффициенты линейной регрессии и их статистические характеристики**

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95%	Верхние 95%
У-пересечение	43,649	13,677	3,191	0,002	16,350	70,948
Переменная a1 (скорость спуска)	69,741	47,826	1,458	0,149	-25,720	165,203
Переменная a2 (концентрация желатина)	10,364	1,119	9,259	0,000	8,130	12,599
Переменная a3 (длина КГС)	-23,492	4,123	-5,697	0,000	-31,722	-15,261
Переменная a4 (температура)	-1,835	0,561	-3,270	0,002	-2,955	-0,715

Как видно из табл. 4 коэффициенты линейной регрессии a1 и a2 являются положительными, а a3 и a4 – отрицательными. Это значит, что с увеличением скорости спуска и концентрации желатина максимальная глубина спуска криогенно-гравийного фильтра увеличивается, а с увеличением длины КГС и температуры скважинной жидкости – уменьшается.

Уравнение множественной линейной регрессии будет выглядеть следующим образом

$$L_{\max} = 43,649 + 69,741 \cdot V + 10,364 \cdot C - 23,492 \cdot I_{\text{кэ}} - 1,835 \cdot t$$

Как видно из табл. 4 наименее достоверный из всех это коэффициент  $a_1$ , стоящий при скорости спуска.

В столбце 6 табл. 1 приведены результаты расчета максимальной глубины спуска фильтра, подсчитанной по этой формуле. Как видно в некоторых случаях максимальная глубина спуска фильтра имеет отрицательные значения. Естественно, эти значения не имеют физического смысла и лишний раз показывают, что линейная модель недостаточно достоверно описывает процесс спуска криогенно-гравийного фильтра.

Построим экспоненциальную регрессионную модель множественной корреляции.

Уравнение экспоненты в общем виде имеет вид:

$$y = a_0 a_1^{x_1} \times a_2^{x_2} \times \dots \times a_n^{x_n}$$

В табл. 5 приведены коэффициенты экспоненциальной регрессии и их статистические характеристики.

Таблица 5. Коэффициенты экспоненциальной регрессии и их статистические характеристики

Коэффициенты регрессии	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Значения коэффициентов	37,159	1,958	1,258	0,585	0,938
Ошибка коэффициентов регрессии	0,200	0,698	0,016	0,060	0,008
Коэффициент детерминации (R-квадрат)	0,835	Ошибка – стандартное отклонение	0,417		
Критерий Фишера F	84,633	Число степеней свободы	67		
Основная сумма квадратов SS	58,826	Остаток	11,642		

Величина значения R-квадрат, которая составляет 0,835; значительно выше, чем при линейной регрессии. Таким образом, экспоненциальная модель регрессии более достоверно описывает протекание процесса транспортировки экспериментального образца КГЭ фильтра на фильтровой колонне с закрытым башмаком, чем линейная.

Уравнение множественной экспоненциальной регрессии будет выглядеть следующим образом

$$L_{\max} = 37,159 \times 1,958^V \times 1,258^C \times 0,585^{I_{\text{кэ}}} \times 0,938^t$$

Самую большую ошибку из всех коэффициентов регрессии также, как и при линейной модели имеет коэффициент  $a_1$ , стоящий при скорости спуска.

В столбце 7 табл. 1 приведены результаты расчета максимальной глубины спуска фильтра, подсчитанной по этой формуле.

### Выводы

1. Линейная модель многофакторной регрессии не позволяет достоверно аппроксимировать результаты стендовых исследований технологии транспортировки криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины. Коэффициент детерминации 0,66.

2. Экспоненциальная модель многофакторной регрессии более достоверно, чем линейная, позволяет аппроксимировать результаты стендовых исследований технологии

транспортировки криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины. Коэффициент детерминации 0,835.

3. В дальнейшем целесообразно провести многофакторный анализ, используя другие модели, например, полиномиальная, степенная, гиперболическая. Это позволит подобрать модель, которая наиболее полно аппроксимирует результаты экспериментальных исследований.

4. Для повышения достоверности результатов многофакторного регрессионного анализа нужно провести дополнительные стендовые исследования для уточнения влияния скорости спуска на максимально возможную глубину спуска.

5. Также необходимо проведение дополнительных стендовых исследований для уточнения влияния температуры на максимально возможную глубину спуска. Эта потребность вызвана малым количеством экспериментов и небольшим диапазоном исследованных температур.

*Метою даної роботи є аналіз результатів стендових досліджень технології транспортування експериментального зразка криогенно-гравійного фільтра по стовбуру свердловини. Для цього був використаний метод багатфакторного регресійного аналізу лінійної та експоненціальної моделі процесу спуску. В результаті виконання роботи було встановлено, що коефіцієнт детермінації лінійної моделі багатфакторної регресії дорівнює 0,66. Експоненціальна модель більш достовірно ніж лінійна дозволяє апроксимувати результати досліджень (коефіцієнт детермінації 0,835). В подальшому доцільно провести багатфакторний регресійний аналіз використовуючи інші моделі, наприклад, поліноміальну, степеневу, гіперболічну. Для підвищення достовірності результатів багатфакторного регресійного аналізу необхідне проведення додаткових стендових досліджень для уточнення впливу швидкості спуску і температури свердловинної рідини на максимально можливу глибину спуску. Знайдена регресійна модель дозволяє спрогнозувати максимальну глибину спуску криогенно-гравійного фільтра при різних геолого-технічних умовах. А це, в свою чергу, дає можливість оптимізувати конструкцію і технологію спуску фільтра.*

**Ключові слова:** криогенно-гравійний фільтр, транспортування фільтра, багатфакторний регресійний аналіз, бурова свердловина.

**A. A. Kozhevnykov, V. L. Khomenko, B. T. Ratov, A. Toktasynov, E. Musaev**  
**MULTIFACTOR REGISTRATION ANALYSIS OF STANDBY RESEARCH OF THE PROCESS**  
**OF TRANSPORTATION OF CRYOGENIC-GRAVEL FILTER ON WELLBORE**

*The purpose of this paper is to analyze the results of bench studies of the technology for transporting an experimental sample of a cryogenic-gravel filter along a wellbore. For this, the method of multifactorial regression analysis of the linear and exponential model of the descent process was used. As a result of the work, it was found that the coefficient of determination of the linear model of multifactor regression is 0.66. The exponential model is more reliable than the linear model that allows approximating the results of the studies (the coefficient of determination is 0.835). In the future, it is expedient to conduct a multifactor analysis using other models, for example, polynomial, power, hyperbolic. To increase the reliability of the results of multivariate regression analysis, it is necessary to conduct additional bench studies to clarify the influence of the rate of descent and the temperature of the borehole fluid on the maximum possible depth of descent. The regression model found allows us to predict the maximum depth of descent of the cryogenic gravel filter under various geological and technical conditions. And this, in turn, makes it possible to optimize the design and technology of the filter descent.*

**Key words:** cryogenic-gravel filter, filter transport, multifactorial regression analysis, borehole.

### Литература

1. Кожевников А. А., Хоменко В. Л. Классификация параметров, влияющих на глубину спуска криогенно-гравийных фильтров / Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. научных трудов. – Вып. 20. – Киев: ИСМ им В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017. – С. 81-85.
2. Башкатов А. Д. Прогрессивные технологии сооружения скважин. – М.: Недра, 2003 – 554с.
3. Справочник по бурению скважин на воду / Д. Н. Башкатов, С. С. Сулакшин, С. Л. Драхлис, Г. П. Квашнин. – М.: Недра, 1979. – 560 с.
4. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
5. Квашнин Г. П., Деревянных А. И. Водозаборные скважины с гравийными фильтрами. – М.: Недра, 1981. – 216 с.
6. Кожевников А. А., Судаков А. К. Криогенно-гравийные фильтры буровых скважин. – Д.: Литограф, 2014. – 305 с.

Поступила 05.06.18

### References

1. Kozhevnykov A. A., & Khomenko V. L. (2017) Klassifikaciia parametrov, vliiaushchikh na glubinu spuska kriogenno-gravijnykh filtrov [Classification of parameters affecting the depth of descent of cryogenic-gravel filters]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tehnologii ego izgotovleniia i primeneniia: sbornik nauchnykh trudov - Rock-cutting and metal-cutter instrument - technical and technology of its manufacture and application: collection of scientific paper, 20*, (pp. 81–85). Kiev: [in Russian].
2. Bashkatov, A. D. (2003). *Progressivnye tehnologii sooruzhenija skvazhin [Progressive technologies of well construction]*. – Moscow: Nedra [in Russian].
3. Bashkatov, D. N., Sulakshin, S. S., Drahlis, S. L., & Kvashnin G. P. (1979) *Spravochnik po bureniu skvazhin na vodu [Handbook of drilling water wells]*. Moscow: Nedra [in Russian].
4. Gavrilko, V. M. & Alekseev, V. S. (1985). *Fil'try burovykh skvazhin [Filters of boreholes]*. – Moscow: Nedra [in Russian].
5. Kvashnin, G. P. & Derevjannyh, A. I. (1981). *Vodozabornye skvazhiny s gravijnymi fil'trami [Water intake wells with gravel filters]*. – Moscow: Nedra [in Russian].
6. Kozhevnykov, A. A. & Sudakov, A. K. (2014). *Kriogenno-graviinye fil'try burovykh skvazhin [Cryogenic-gravel filters of boreholes]*. Dnipro: Litograf [in Russian].

УДК 622.24

**А. А. Кожевников**, д-р техн. наук, **А. Ф. Камышацкий**, канд. техн. наук

*Национальный технический университет «Днепровская политехника», пр. Дмитрия Яворницкого 19, 49000г. Днепр, Украина, e-mail: trmpi@outlook.com*

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАБОТЫ КАВИТАТОРОВ РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Задачей научного исследования является оценка энергоемкости работы разработанного суперкавитационного генератора в сравнении с классическим кавитационным генератором «трубка Вентури». Для решения поставленной задачи при научном исследовании был использован классический подход, который заключается в сравнении потери давления на исследуемых кавитационных генераторах. Основные выводы заключаются в следующем: эффективность использования гидродинамической кавитации подтверждена разработками способов и устройств