СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛЯНОКИСЛОТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

STATISTICAL ESTIMATION OF THE FACTORS AFFECTING THE HYDROCHLORIC ACID IMPACT EFFECTIVENESS

Ш. Р. Ганиев
Shamil R. Ganiev

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. В. Лысенков
Aleksei V. Lysenkov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Большое количество нефтяных пластов западной части Республики Башкортостан относятся к отложениям девонской системы — это песчаные отложения пашийского, муллинского и старооскольского горизонтов среднего девона и карбонатные отложения заволжского надгоризонта, нижележащие карбонаты фаменского яруса верхнего девона, а также к отложениям нижнего карбона — терригенные отложения бобриковского и карбонаты кизеловского горизонтов. Крупнейшие месторождения западной части Республики Башкортостан находятся на завершающей стадии разработки. Запасы высокопродуктивных терригенных пластов в большей степени отобраны, наблюдается увеличение процента падения добычи нефти, растет обводненность скважин. Все эти факторы увеличивают затраты на разработку месторождений и приводят к увеличению осложненного фонда скважин. Повышение эффективности разработки карбонатных коллекторов месторождений Западного Башкортостана, содержащих значительные запасы нефти, имеет огромное значение и приобретает приоритетное направление в научно-практической деятельности предприятий, работающих в области нефтегазодобывающей промышленности. Когда речь заходит об эффективности, возникает вопрос о способе оценки успешности геолого-технического мероприятия.

Проведение статистического анализа по выявлению некоторых зависимостей, в частности зависимости увеличения кратности дебита скважины после геолого-технического мероприятия, позволяет, с одной стороны, определить значимые показатели при проведении обработок и оптимизировать процесс, а с другой стороны, по известным или заранее заданным геолого-промысловым и технологическим показателям прогнозировать эффективность солянокислотного воздействия. Подобные задачи можно осуществить несколькими методами. Одним из таких методов является регрессионный анализ. В статье приведены результаты выявления статистической зависимости между кратностью прироста дебита нефти и важным технологическим параметром — удельным расходом кислоты при различных видах солянокислотного воздействия на трещиновато-пористые карбонатные нефтенасыщенные пласты.

Most of the oil deposits in the western part of the Republic of Bashkortostan are related to the Devonian sediments — the sandstones of the Pashya, Mullin and Starooskolsky horizons of the Middle Devonian and the carbonate deposits of the Zavolzhsky overhorizon, underlying Carbonates of the Famennian Stage of the Upper Devonian, and also the Lower Carboniferous deposits of Bobrikov and Kizelov horizons. The largest deposits of this region are at a late stage of development. The reserves of highly productive terrigenous layers have been largely developed, oil production rate is decreasing, and wells water production is growing. All this increases the costs of field development and leads to a large number of complications during operation and repair of wells. Increasing the efficiency of exploitation of carbonate reservoirs of reservoirs of West Bashkortostan containing significant oil reserves is of great industrial importance and acquires a priority direction in the scientific and practical activities of oil and gas producing enterprises.

Ключевые слова

солянокислотное
воздействие,
статистический
анализ,
удельный расход,
кратность
прироста дебита

However, when it comes to efficiency, the question arises of how to evaluate the success of an activity.

Carrying out a statistical analysis on identification of some dependences, in particular the dependence of increasing the frequency of well production after geological and engineering operations, on the one hand, makes it possible to identify the most significant factors during processing and optimize the process, and on the other hand, according to the known or predefined geological-field and technological indicators, forecast hydrochloric acid effectiveness.

The implementation of such tasks is possible by using several methods. One of such methods is regression analysis. The article presents the results of revealing the statistical relationship between the multiplicity of the increase in oil production rate and the important technological parameter — specific acid consumption for various types of hydrochloric acid effect on fractured porous carbonate oil saturated layers.

Key words

hydrochloric acid effect, statistical analysis, specific consumption, multiplicity of growth rate

При выборе метода солянокислотного воздействия (СКВ) на призабойную зону пласта (ПЗП) карбонатных объектов разработки важно знать не только критерии применимости той или иной солянокислотной обработки (СКО), но и учитывать влияние геолого-физических и технологических параметров на успешность СКВ. На сегодняшний день актуальным остается вопрос влияния исходных параметров обработки на эффективность солянокислотного воздействия. Параметром, вносящим основной вклад на успешность обработки призабойной зоны пласта кислотой, является параметр «удельный расход кислоты». Основываясь на накопленном опыте, удельный расход для первичных обработок устанавливают 0,6–1,0 м³ на метр толщины обрабатываемого пласта, при вторичных обработках 1–1,5 м³/м. Однако не всегда выбор данного параметра из диапазона, представленного выше, приводит к положительным результатам. Отсюда следует, что необходимо более обосновано подходить к выбору удельного расхода закачиваемой кислоты. Для установления степени влияния удельного расхода на эффективность солянокислотного воздействия авторами предлагается изучить данный вопрос методами математической статистики. Одним из методов математической статистики, позволяющим выявить зависимость между изучаемыми параметрами, является регрессионный анализ [1–3].

Авторами построена модель парной линейной регрессии, где в качестве функции отклика

(Y_i) используется кратность увеличения дебита нефти до и после обработки, а в качестве зависимого параметра (X) используется удельный объем закачиваемой кислоты. Расчеты проведены для каждого продуктивного горизонта карбонатных коллекторов Западного Башкортостана и каждого вида кислотных обработок, проведенных в 2003–2008 гг.

Связь между результирующим параметром (Y_i) и независимой переменной (X_i) может быть описана уравнением парной линейной корреляции:

$$Y_1 = b_0 + b_1 \cdot x, \quad (1)$$

где b₀, b₁ — оценки коэффициентов уравнения множественной линейной регрессии.

Для оценки степени корреляции между фактическими и вычисленными значениями используется коэффициент детерминации R²:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y^*)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y')^2}, \quad (2)$$

где Y* — расчетное значение по получившемуся уравнению регрессии;

Y' — математическое ожидание параметра;

Y_i — фактическое значение зависимого параметра.

Коэффициент детерминации показывает, на сколько фактические значения отличаются от вычисленных. Если R² стремится к 1, значит, имеется полная корреляция между расчетными и фактическими значениями Y. Оценку тесноты связи определяют, пользуясь таблицей 1.

Таблица 1. Оценка тесноты линейной корреляционной связи

Теснота связи	Величина R ²	
	Положительная (связь прямая)	Отрицательная (связь обратная)
Линейной связи нет	0 ... 0,2	0 ... -0,2
Слабая	0,2 ... 0,5	-0,2 ... -0,5
Средняя	0,5 ... 0,75	-0,5 ... -0,75
Сильная	0,75 ... 0,95	-0,75 ... -0,95
Функциональная	0,95 ... 1	-0,95 ... -1

Для проверки соответствия уравнения опытным данным применяют критерий Фишера-Снекорда. По данному критерию можно сделать выводы о случайности взаимосвязи между изучаемыми параметрами. Критерий Фишера рассчитывается по формуле

$$F = \frac{n - p - 1}{p} \cdot \frac{R^2}{1 - R^2}, \quad (3)$$

где n — число наблюдений;

p — число независимых переменных;

R_2 — коэффициент детерминации.

Полученные значения F сравнивают с табличным значением, которое подбирается по степеням свободы $(n-p-1)$, при вероятности ошибки 0,05. Если получившиеся значения F превышают табличные, значит, гипотеза об отсутствии взаимосвязи отклоняется (нулевая гипотеза), т. е. связь между параметрами не случайна.

Для оценки степени значимости каждого из коэффициентов регрессии на величину Y используется t -критерий, именуемый критерием Стьюдента, который определяется по формуле

$$t = \frac{R_i}{S_r}, \quad (4)$$

где R_i — коэффициент корреляции;

S_r — среднеквадратичная ошибка.

Если t больше $t_{\alpha, n-p-1}$, где $t_{\alpha, n-p-1}$ выбирается из соответствующих таблиц распределения Стьюдента (p -значение), то коэффициент X имеет статистическую значимость для величины Y .

Адекватность уравнения множественной регрессии оценивается по средней ошибке аппроксимации ε , которая вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{p} \sum \frac{|Y - Y^*|}{Y} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где p — число факторов;

Y — фактические значения параметров;

Y^* — расчетные значения параметров.

В качестве исходной информации использовались данные по 357 скважинам фаменского, заволжского и турнейского ярусов месторождений Западного Башкортостана. Данные сгруппированы по этим объектам и видам кислотного воздействия: простая кислотная обработка (КО), нефтекислотная обработка (НКО), пенокислотная обработка (ПКО), термокислотная обработка (ТКО). Вычисления проводились в современном программном комплексе «Statistica 11».

Регрессионные уравнения зависимости кратности прироста дебита от удельного объема расхода кислоты представлены в таблице 2. Коэффициенты корреляции представлены в таблице 3.

Исходя из полученных уравнений регрессии, опираясь на таблицу 1, можно сделать вывод, что по скважинам турнейского яруса не наблюдается линейной связи между удельным расходом кислоты и кратностью прироста дебита, кроме термокислотной обработки. Связь между параметрами кратности прироста дебита и удельного расхода кислоты в этом случае средняя. По скважинам фаменского яруса существует слабая связь между параметрами прироста дебита и удельного расхода кислоты при нефтекислотной обработке. Также средняя связь наблюдается между параметрами при кислотной обработке заволжского горизонта. Наблюдается слабая связь между параметрами по скважинам заволжского горизонта при ПКО, ТКО.

Таблица 2. Регрессионные уравнения зависимости кратности прироста дебита от удельного объема расхода кислоты

Уравнение регрессии				
Горизонт/вид КО	КО	НКО	ПКО	ТКО
$C_{тур}$	$y = 2,61 + 0,32x$	$y = 2,35 + 0,36x$	—	$y = -5,44 + 8,21x$
$D_{фам}$	$y = 2,82 - 1,19x$	$y = 4,07 - 1,35x$	$y = 4,20 - 1,48x$	$y = 4,50 - 0,75x$
$D_{зав}$	$y = 1,35 - 1,82x$	$y = 3,02 - 0,15x$	$y = 3,03 + 1,83x$	$y = 4,49 - 1,55x$

Таблица 3. Коэффициенты корреляции

Коэффициент корреляции R				
Горизонт/вид КО	КО	НКО	ПКО	ТКО
$C_{тур}$	0,11	0,14	—	0,6
$D_{фам}$	0,11	0,3	0,11	0,18
$D_{зав}$	0,58	0,03	0,34	0,28

По горизонтам, в которых коэффициент корреляции был выше 0,2, то есть прослеживалась хоть какая-то связь между параметрами, были вычислены критерии Фишера-Снекорда на предмет неслучайности связи. Результаты вычислений представлены в таблице 4.

В результате геолого-статистического моделирования были построены регрессионные

уравнения по трем объектам месторождений Башкортостана при различных видах КО. В тех случаях, когда связь между параметрами была сильной или средней, были вычислены критерии Фишера. Было выявлено, что связь между параметрами кратности прироста дебита и удельным расходом кислоты не случайна при нефтекислотной обработке фаменского яруса.

Таблица 4. Результаты проверки регрессионных моделей на неслучайность связи между параметрами

Горизонт	Вид КО	Уравнение регрессии	Число наблюдений	F _{табл.}	F _{расчет.}	Вывод о связи между параметрами
Д _{зав}	КО	$y = 1,35 - 1,82x$	10	5,32	4,06	Связь случайна
С _{тур}	ТКО	$y = -5,44 + 8,21x$	4	18,51	1,13	Связь случайна
Д _{фам}	НКО	$y = 4,07 - 1,35x$	50	4,04	4,75	Связь не случайна
Д _{зав}	ПКО	$y = 3,03 + 1,83x$	6	7,71	0,52	Связь случайна
Д _{зав}	ТКО	$y = 4,49 - 1,55x$	9	5,59	0,60	Связь случайна

Выводы

Таким образом, анализ построенных регрессионных моделей выявил наиболее представительную из них — это уравнение регрессии $y = 4,07 - 1,35x$. Коэффициент при уравнении регрессии равен — 1,35, это означает, что в 30 % случаев при увеличении удельного расхода кислоты при нефтекислотной обработке карбонатных пластов фаменского яруса кратность увеличения дебита будет снижаться. Данный факт может объясняться тем, что в данных обработках требуется соблюдать оптимальное соотношение удельного расхода кислоты и удельного темпа нагнетания кислоты в пласт. Не всегда увеличение удельных объемов кислоты сопровождается увеличением темпов закачки по той причине, что повышение темпов закачки ограничено допустимым давлением. Ведь увеличение глубины кислотного воздействия на коллектор достигается путем не только увеличения объема закачки кислоты, но и обеспечением необходимого темпа закачки кислоты в пласт. Невыполнение данного условия приводит к тому, что в более глубокие зоны проникает уже неактивная кислота, либо зона, охвачен-

ная кислотным воздействием, растет не в глубь пласта, а распространяется вдоль скважины. Это может вызывать негативные последствия: подключение водоносных прослоев и образование заколонной циркуляции. Заметим, что высок вклад факторов, не вошедших в уравнение регрессии. Данный факт указывает, что перспективнее рассматривать влияние нескольких параметров на эффективность солянокислотного воздействия. Многофакторный анализ позволит выявить степень влияния сразу нескольких исходных параметров обработки на ее эффективность [3–7]. Впрочем, природа нечасто бывает полностью предсказуемой, и при многофакторном анализе обычно имеется существенный разброс исходных точек относительно результирующей прямой. Для того чтобы увеличить адекватность моделей, необходимо учесть некоторые граничные условия, связанные с классификацией пород-коллекторов [4], вскрытых обрабатываемыми скважинами, видами скважин (вертикальная, горизонтальная), режимами работы скважин (малодебитные, высокодебитные) и т. д.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Математическая статистика / Р.Р. Абзалимов, Т.Р. Акмадиева, Е.П. Аносова и др. 2-е изд., испр. и доп. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. 93 с.
2. Баязитова В.Р., Лысенков А.В. Результаты регрессионного анализа эффективности гипанокислотных обработок призабойных зон скважин кизеловского горизонта Копей-Кубовского месторождения // Нефтегазовое дело. 2009. Т. 7. № 1. С 57–61.

3. Якубов Р.Н., Улямаев А.А., Лысенков А.В., Антипин Ю.В. Оценка эффективности гипанокислотных обработок скважин Копей-Кубовского месторождения // Тез. докл. 62-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2010. С. 289.

4. Лысенков А.В. Повышение эффективности комбинированного солянокислотного воздействия при разработке обводненных карбонатных коллекторов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2009. 154 с.

5. Якубов Р.Н., Лысенков А.В., Мухамадеев Б.М. Анализ эффективности кратных полимеркислотных обработок высокообводненных скважин // Тез. докл. 65-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. С. 141.

6. Якубов Р.Н., Антипин Ю.В., Лысенков А.В. Анализ эффективности кратного полимеркислотного воздействия на призабойную зону скважин Копей-Кубовского месторождения // Проблемы геологии, геофизики, бурения и добычи нефти. Экономика и управление: сб. статей / НПФ «Геофизика». Уфа, 2013. вып. 10. С. 5–12.

7. Якубов Р.Н., Антипин Ю.В., Лысенков В.А., Чеботарев А.В. О перспективе применения солянокислотных обработок скважин на поздней стадии разработки // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 2. С. 22–27.

REFERENCES

1. Abzalimov R.R., Akmadieva T.R., Anosova E.P. et al. *Matematicheskaya statistika. 2-e izd., ispr. i dop.* [Mathematical Statistics. 2-nd Edit., Corrected and Supplemented]. Ufa, UGNTU Publ., 2016. 93 p. [in Russian].

2. Bayazitova V.R., Lysenkov A.V. Rezul'taty regressionnogo analiza effektivnosti gipankislotnykh obrabotok prizaboynykh zon skvazhin kizelovskogo gorizonta Kopei-Kubovskogo mestorozhdeniya [Results of the Regression Analysis of the Efficiency of Hypano Acid Treatments of the Bottomhole Zones of the Kizel Horizon of the Kopei-Kubovskoye field]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2009, Vol. 7, No. 1, pp. 57–61. [in Russian].

3. Yakubov R.N., A.A. Ulyamaev A.A., Lysenkov A.V., Antipin Yu.V. Otsenka effektivnosti gipankislotnykh obrabotok skvazhin Kopei-Kubovskogo mestorozhdeniya [Evaluation of the Effectiveness Gitano Acid Treatment of Wells Kopei-Kubovskoye Field]. *Tez. dokl. 62-i nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i*

molodykh uchenykh [Abstracts of the 62th Scientific-Technical Conf. Students, Graduate Students and Young Scientists]. Ufa, UGNTU Publ., 2010, p. 289. [in Russian].

4. Lysenkov A.V. *Povyshenie effektivnosti kombinirovannogo solyanokislotnogo vozdeistviya pri razrabotke obvodnennykh karbonatnykh kollektorov. dis. kand. tekhn. nauk.* [Improving the Efficiency of the Combined Hydrochloric Acid Exposure in the Development of Water-Flooded Carbonate Reservoirs. Kand. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, UGNTU Publ., 2009. 154 p. [in Russian].

5. Yakubov R.N., Lysenkov A.V., Mukhamadeev B.M. Analiz effektivnosti kratnykh polimerkislottnykh obrabotok vysokoobvodnennykh skvazhin. [Analysis of the Effectiveness of Multiple Treatments Polymer-Acid Highly Watered Wells]. *Tez. dokl. 65-i nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh.* [Abstracts of the 65th Scientific-Technical Conf. Students, Graduate Students and Young Scientists]. Ufa, UGNTU Publ., 2014, pp. 141. [in Russian].

6. Yakubov R.N., Antipin Yu.V., Lysenkov A.V. Analiz effektivnosti kratnogo polimerkislottnogo vozdeistviya na prizaboynuyu zonu skvazhin Kopei-Kubovskogo mestorozhdeniya [Analysis of the Effectiveness of Multiple Polymer-Acid Effects on the Bottomhole Zone of Kopei-Kubovskoye Oilfield]. *Sb. statei NPF «Gefizika» «Problemy geologii, gefiziki, bureniya i dobychi nefi. Ekonomika i upravlenie»* [Collection of Articles of NPF «Geophysics» «Problems of Geology, Geophysics, Drilling and Oil Production. Economics and Management»]. Ufa, 2013, Issue 10, pp. 5–12. [in Russian].

7. Yakubov R.N., Antipin Yu.V., Lysenkov V.A., Chebotarev A.V. O perspektive primeneniya solyanokislotnykh obrabotok skvazhin na pozdnei stadii razrabotki [The Prospect of Applying Hydrochloric Acid Treatments of Wells at a Late Stage of Development]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2012, Vol. 10, No. 2, pp. 22–27. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Ганиев Шамиль Рамилевич, магистрант, кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Shamil R. Ganiev, Undergraduate Student of Development and Operation of Oil and Gas Oil Fields Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

email: ganiev.shml@rambler.ru

Лысенков Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газонефтяных месторождений», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Aleksei V. Lysenkov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Development and Operation of Oil and Gas Oil Fields Department, USPTU, Ufa, Russian Federation