



УДК 622.279.7

## ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСПЕШНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИНАХ НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



### FEATURES FOR FORECASTING SUCCESSFUL REPAIR WORKS IN OPERATIONAL WELLS OF OIL AND GAS-CONDENSATE FIELDS

**Долгов Сергей Иванович**

магистрант кафедры  
«Разработка и эксплуатация нефтяных  
и газовых месторождений»,  
Тюменский индустриальный университет  
Sergeidolgov2689@gmail.com

**Dolgov Sergey Ivanovich**

Graduate Student of the Department  
«Development and operation  
of oil and gas fields»,  
Tyumen Industrial University  
Sergeidolgov2689@gmail.com

**Аннотация.** Приводится обоснование вероятностной природы успешности ремонтно-восстановительных работ (РВР) и необходимости применения для ее прогнозирования методов распознавания образов. Дается описание процедуры отбора влияющих факторов и алгоритма решения задачи распознавания образов РВР при помощи метода последовательного статистического анализа.

**Annotation.** The substantiation of the probabilistic nature of the success of repair and restoration works (RRW) and the need to use pattern recognition methods for its prediction are given. A description is given of the procedure for selecting influencing factors and an algorithm for solving the problem of recognizing RRW images using the method of sequential statistical analysis.

**Ключевые слова:** скважина, ремонтно-восстановительные работы, факторы успешности, эффективный технологический процесс, эмпирические вероятности.

**Keywords:** well, repair work, success factors, effective technological process, empirical probabilities.

При проведении ремонтно-восстановительных работ в эксплуатационных скважинах нефтегазоконденсатных месторождений возникает задача оценки возможного характера течения технологического процесса и принятия решения о выборе управляющих воздействий для эффективного ведения и получения положительного результата работ. Приходится сталкиваться с объектами и процессами, характеризующимися широким набором количественных и качественных признаков.

Для решения этой задачи необходимо создать формализованное описание рассматриваемых объектов, процессов или ситуаций, зависящих от большого числа факторов, определяющих конечный результат работ. Многообразие этих факторов носит вероятностный характер, при этом ситуации находятся в условиях неопределенности, и их оценка носит характер распознавания образов [1].

Особенно актуален такой подход в условиях отсутствия детальной информации о состоянии скважин и эксплуатационных объектов, необходимой для планирования работ, связанного с высокой стоимостью или невозможностью проведения дополнительных исследований проблемных скважин перед их ремонтом, а также отсутствием методов объективного контроля процессов и результатов отдельных этапов РВР.

Успешность РВР зависит от различных по значимости неуправляемых и управляемых факторов. Многообразие данных факторов обуславливает вероятностную природу успешности РВР. В этих условиях, при отсутствии детальной информации о геологических и гидродинамических условиях проведения РВР, техническом состоянии скважины необходимо применение методов математической статистики, позволяющих выявить факторы, определяющие успешность мероприятий по ремонту скважин, оценить эти факторы по значимости и выявить пределы их изменения, обуславливающие успешный или неуспешный результат работ.

При этом успешность РВР может быть определена различными способами. Наиболее универсальным представляется способ определения успешности РВР как запуск скважины в шлейф после проведения работ, а неуспешности – как невозможность запуска скважины в шлейф после РВР. Несмотря на допустимость практического использования такого универсального способа, следует отметить, что при наличии возможностей принимаемый критерий успешности или неуспешности РВР должен учитывать специфические особенности и конечные цели конкретного вида РВР, так как только при этом условии предлагаемая методика позволит минимизировать количество используемых факторов и достичь максимальной обоснованности получаемого прогноза. В качестве критерия успешности может быть принят любой технологически обоснованный и инструментально подтверждаемый критерий.



Прогнозирование успешности проведения РВР на скважинах проводится в процессе решения задачи классификации, т.е. путем применения метода распознавания образов РВР с успешным или неуспешным результатом их выполнения. Под образом РВР понимается обобщение множества различных представлений о РВР, из которых выделяются наиболее устойчивые их характеристики. В этом случае РВР описываются упорядоченной совокупностью факторов, т.е. вектором состояния РВР. Компонентами данного вектора служат факторы, характеризующие как состояние скважины, на которой предполагается проведение работ, так и планируемые параметры проведения РВР. Численные значения компонент вектора состояния РВР определяются на основании фактических данных о ранее проведенных ремонтах и дают эмпирический образ РВР в выбранном пространстве факторов.

Так как предполагается отсутствие одинаковых статистических свойств элементов генеральной совокупности по каждой из компонент вектора состояния РВР, то предлагаемая методика основывается на применении непараметрического метода распознавания образа, не требующего знания законов распределения компонент вектора и при использовании которого не вычисляются параметры распределения.

Основной метода распознавания образов являются процессы обучения и адаптации. Процесс обучения состоит в накоплении и целенаправленной переработке поступающей информации о фактически выполненных РВР. При этом результаты новых ремонтов служат основой для пересмотра предшествующего представления об успешности проведения РВР. Изменение представлений об объекте в зависимости от объема информации и выработка новых образов составляют основную сущность процесса адаптации.

В целях построения классификатора для распознавания РВР с успешным или неуспешным результатами путем экспертных оценок формируется генеральная совокупность факторов, характеризующих процесс проведения работ. Из генеральной совокупности выделяются факторы, которые несут информацию, являющуюся специфичной для успешных и неуспешных РВР (информативные факторы).

Информативность каждого фактора сформированной генеральной совокупности определяется на основе проверки наличия различий в средних значениях элементов в выборках, взятых из классов успешных и неуспешных РВР по этому фактору. Наличие значимых различий указывает на существенность исследуемого фактора для целей построения классификатора и наоборот. Проверка на информативность каждого фактора генеральной совокупности проводится по критерию Манна-Уитни [2] и делится на несколько этапов.

• По проверяемому *i*-му фактору генеральной совокупности формируются две выборки, состоящие из *n* и *m* наблюдений, для РВР, признанных успешными  $X_{(1)}$  и неуспешными  $X_{(2)}$ :

$$X_{(1)1}, X_{(1)2}, \dots, X_{(1)i}, \dots, X_{(1)n}, \tag{1}$$

$$X_{(2)1}, X_{(2)2}, \dots, X_{(2)i}, \dots, X_{(2)m}, \tag{2}$$

где *n* – количество значений фактора по скважинам с успешным исходом РВР; *m* – количество значений фактора по скважинам с неуспешным исходом РВР.

Сформированные выборки объединяются в один ряд данных, упорядоченный по возрастанию

$$X_{(2)1}, X_{(1)2}, X_{(1)3}, \dots, X_{(2)k}, X_{(1)k}, \tag{3}$$

где 1, 2, ..., *k* – значение *i*-го фактора в порядке возрастания для успешного (1) и неуспешного (2) исхода работ.

• На основании полученного ряда данных для *i*-го фактора определяются инверсии для успешного и неуспешного исхода работ. Инверсия для каждого элемента из  $X_{(1)}$  определяется как количество элементов из  $X_{(2)}$ , стоящих в перед элементом из  $X_{(1)}$  и наоборот, инверсия для каждого элемента из  $X_{(2)}$  определяется как количество элементов из  $X_{(1)}$ , стоящих в ряду перед данным элементом из  $X_{(2)}$ .

Число инверсий *i*-го фактора для успешного и неуспешного исхода работ определяется по формулам (4) и (5) соответственно:

$$U_{(1)} = \sum_{j=1}^n \text{inv}(X_{(1)})_j, \tag{4}$$

$$U_{(2)} = \sum_{j=1}^m \text{inv}(X_{(2)})_j, \tag{5}$$

где  $U_{(1)}$  – сумма инверсий для выборки *i*-го фактора с успешным исходом работ;  $U_{(2)}$  – сумма инверсий для выборки *i*-го фактора с неуспешным исходом работ;  $\text{inv}(X_{(1)})_j$  – значение инверсии для *j*-го элемента выборки *i*-го фактора с успешным исходом работ;  $\text{inv}(X_{(2)})_j$  – значение инверсии для *j*-го элемента выборки *i*-го фактора с неуспешным исходом работ.



Исходя из полученных значений  $U_{(1)}$  и  $U_{(2)}$ , определяется величина  $\tilde{U}$ , которая равна минимальному из значений  $U_{(1)}$  и  $U_{(2)}$ .

• По найденному значению  $\tilde{U}$  и формуле (6) определяется критерий  $Z$  для рассматриваемого  $i$ -го фактора:

$$Z = \frac{\tilde{U} - \frac{mn}{2} - \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{mn(m+n+1)}{12}}} \tag{6}$$

На основании определенной величины критерия  $Z$  определяется его уровень значимости, который характеризует вероятность наличия у выборок с успешным и неуспешным исходом работ различия в средних значениях, т.е. информативность рассматриваемого фактора для использования в задаче прогнозирования успешности РВР. Уровень значимости критерия  $Z$  соответствует плотности стандартного нормального интегрального распределения:

$$G(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}x^2} dx, \tag{7}$$

где  $G(z)$  – уровень значимости для значения  $Z$ .

Вероятность существования различий в средних для выборок с успешным и неуспешным исходом работ для  $i$ -го фактора определяется по формуле (8):

$$P = 100(1 - G(z)), \% \tag{8}$$

Факторы, с вероятностью существования различий в средних 70 % и более, используются в дальнейшем для задачи распознавания образов РВР.

Задача распознавания образов РВР с целью прогнозирования их успешности решается при помощи последовательной диагностической процедуры, которая основывается на методе последовательного статистического анализа, разработанного А. Вальдом [3]. При этом могут быть использованы и качественные факторы. Решение задачи распознавания образов РВР проводится в следующем порядке.

1) Совокупность значений каждого  $i$ -го влияющего фактора разбивается на 8 интервалов (градаций), величина которых определяется по формуле:

$$c = \frac{X_i \max - X_i \min}{8}, \tag{9}$$

где  $X_i \max$  – максимальное значение  $i$ -го фактора;  $X_i \min$  – минимальное значение  $i$ -го фактора.

Для качественных факторов процесс дискретизации является естественным и количество градаций не лимитируется.

2) Определяются эмпирические вероятности успешного и неуспешного исходов работ для  $i$ -го фактора на  $j$ -ом интервале по формулам (10) и (11) соответственно:

$$P(X_{(1)i}^j) = \frac{n_i^j}{n} + \frac{1}{n+m+1}, \tag{10}$$

$$P(X_{(2)i}^j) = \frac{m_i^j}{m} + \frac{1}{n+m+1}, \tag{11}$$

где  $P(X_{(1)i}^j)$ ,  $P(X_{(2)i}^j)$  – эмпирическая вероятность успешного (1) и неуспешного (2) исхода работ для  $i$ -го фактора на  $j$ -ом интервале;  $n$ ,  $m$  – число успешных или неуспешных исходов работ для  $i$ -го фактора соответственно;  $n_i^j$ ,  $m_i^j$  – число успешных или неуспешных исходов работ для  $i$ -го фактора на  $j$ -ом интервале соответственно.

3) На основании рассчитанных эмпирических вероятностей с целью сглаживания их случайных колебаний методом вычисления взвешенной скользящей средней определяются средневзвешенные вероятности факторов на интервалах для успешного и неуспешного исхода РВР по формулам (12) и (13) соответственно [4]:

$$\bar{P}(X_{(1)i}^j) = \frac{1}{10} [P(X_{(1)i}^{j-2}) + 2P(X_{(1)i}^{j-1}) + 4P(X_{(1)i}^j) + 2P(X_{(1)i}^{j+1}) + P(X_{(1)i}^{j+2})], \tag{12}$$



$$\bar{P}(X_{(2)i}^j) = \frac{1}{10} [P(X_{(2)i}^{j-2}) + 2P(X_{(2)i}^{j-1}) + 4P(X_{(2)i}^j) + 2P(X_{(2)i}^{j+1}) + P(X_{(2)i}^{j+2})], \quad (13)$$

где  $\bar{P}(X_{(1)i}^j)$ ,  $\bar{P}(X_{(2)i}^j)$  – средневзвешенная вероятность успешного (1) и неуспешного (2) исхода работ для i-го фактора на j-ом интервале.

При этом предполагается, что значения эмпирических вероятностей i-го фактора на интервалах за пределами крайних (<1 или >8) равны нулю.

4) Определяется диагностический коэффициент для i-го фактора на j-ом интервале по формуле:

$$DK(X_i^j) = \lg \frac{\bar{P}(X_{(1)i}^j)}{\bar{P}(X_{(2)i}^j)}, \quad (14)$$

где  $DK(X_i^j)$  – диагностический коэффициент для i-го фактора на j-ом интервале.

Для качественных факторов диагностический коэффициент определяется по формуле:

$$DK(X_i^j) = \lg \frac{P(X_{(1)i}^j)}{P(X_{(2)i}^j)}. \quad (15)$$

5) Определяется информативность диагностического коэффициента для i-го фактора на j-ом интервале, под которой понимается степень различий распределений фактора при успешном и неуспешном исходе работ. Информативность диагностического коэффициента определяется по формуле

$$J(X_i^j) = \frac{DK(X_i^j) [\bar{P}(X_{(1)i}^j) - \bar{P}(X_{(2)i}^j)]}{2}, \quad (16)$$

где  $J(X_i^j)$  – информативность диагностического коэффициента для i-го фактора на j-ом интервале.

6) Определяется информативность диагностического коэффициента для i-го фактора по формуле:

$$J(X_i) = \sum_{j=1}^8 J(X_i^j), \quad (17)$$

где  $J(X_i)$  – информативность диагностического коэффициента для i-го фактора.

7) Классификатором процедуры распознавания образов служит диагностическая таблица, которая представляет собой сводку полученных диагностических коэффициентов и показателей информативности и формируется на основе расположенных в порядке убывания информативности влияющих факторов. Минимальная информативность фактора для его включения в диагностическую таблицу принимается равной 0,05. При этом каждому фактору поставлены в соответствие интервалы изменения, соответствующие им диагностические коэффициенты и информативности.

8) Экспертной оценкой определяется необходимый уровень надежности распознавания образа РВР путем установления величин допустимых ошибок первого ( $\alpha$  – вероятность отнесения неуспешного исхода работ к успешному) и второго ( $\beta$  – вероятность отнесения успешного исхода работ к неуспешному) рода.

9) Исходя из принятых значений ошибок первого и второго рода определяются диагностические пороги успешного (A) и неуспешного (B) исходов работ по формулам (18) и (19) соответственно:

$$A = \lg \frac{1 - \alpha}{\beta}, \quad (18)$$

$$B = \lg \frac{\alpha}{1 - \beta}, \quad (19)$$

10) Для отнесения образов, планируемых РВР на скважине к категории успешных или неуспешных, необходимо осуществлять последовательное суммирование диагностических коэффициентов, определенных для соответствующих интервалов влияющих факторов, в порядке убывания информативности для факторов до нарушения основного неравенства диагностической процедуры:

$$B < \sum_{i=1}^n DK(X_i^j) < A, \quad (20)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  – номера факторов по возрастанию информативности.



При этом возможно три варианта:

- если  $\sum_{i=1}^n DK(X_i^j) > A$ , то прогнозируется успешность планируемых РВР;
- если  $\sum_{i=1}^n DK(X_i^j) < B$ , прогнозируется неуспешность планируемых РВР;

– если при последовательном использовании всей имеющейся диагностической информации основное соотношение диагностической процедуры остается все время правильным (т.е. ни разу не достигается ни один из диагностических порогов), то выносится решение: «имеющейся информации недостаточно для принятия решения с заданным уровнем ошибок».

Использование приведенной методики не ограничено конкретными видами РВР и при условии корректного определения критериев успешности имеет универсальное прикладное значение. Основным и очевидным препятствием для ее эффективного применения представляется недостаточный объем достоверной статистической информации, в результате чего достоверность прогноза успешности РВР, полученного по данной методике, может оказаться на недостаточном для практического внедрения уровне. В то же время необходимо отметить, что целенаправленное развитие информационной базы по фактически проведенным РВР при синхронной адаптации классификатора распознавания образов РВР (диагностической таблицы) является тем ключевым направлением совершенствования организации ремонтных работ, который позволит существенно повысить обоснованность и точность получаемых по приведенной методике прогнозов.

### Литература

1. Аветисов А.Г., Булатов А.И., Шаманов С.А. Методы прикладной математики в инженерном деле при строительстве нефтяных и газовых скважин. – М. : ООО «Недра – Бизнесцентр», 2003. – 239 с.
2. Аветисов А.Г., Кошелев А.Т., Крылов В.И. Ремонтно-изоляционные работы при бурении нефтяных и газовых скважин. – М. : «Недра», 1981. – 215 с.
3. Вальд А. Последовательный анализ. – М. : Физматгиз, 1960. – 328 с.
4. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. – Л. : Медицина, 1973. – 141 с.

### References

1. Avetisov A.G., Bulatov A.I., Shamanov S.A. Methods of applied mathematics in engineering in the construction of oil and gas wells. – M. : Nedra – Business Center LLC, 2003. – 239 p.
2. Avetisov A.G., Koshelev A.T., Krylov V.I. Repair and insulation work while drilling oil and gas wells. – M. : «Nedra», 1981. – 215 p.
3. Wald A. Sequential analysis. – M. : Fizmatgiz, 1960. – 328 p.
4. Gubler E.V., Genkin A.A. Application of nonparametric statistical criteria in biomedical research. – L. : Medicine, 1973. – 141 p.