УДК 622.4

Фомин Анатолий Иосифович, профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы, д.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Грунской Тарас Валерьевич, заведующий каф. ХХТЭиТБ, канд. техн. наук, доцент
(УГТУ, г. Ухта)
Fomin Anatoly Iosifovich, Professor, Department of Aerology, Occupational Safety, and Environmental Protection, Doctor of Technical Sciences
(KuzSTU, Kemerovo)
Grunskoy Taras Valerievich, Head of the Department of CCTEandIS, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.
(USTU, Ukhta)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОРЫВОВ ПАРА В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ПРИ ТЕРМОШАХТНОЙ РАЗРАБОТКЕ ЯРЕГСКОГО НЕФТЕТИТАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING STEAM BREAKTHROUGHS INTO MINE WORKINGS DURING THERMAL-SHAFT MINING OF THE YAREGA OIL-TITANIUM DEPOSIT

Аннотация В статье представлена математическая модель прогнозирования прорыва пара в горные выработки нефтешахт, учитывающая комплекс геологических, гидродинамических и технологических факторов. На основе анализа условий термошахтной разработки Ярегского нефтетитанового месторождения установлены ключевые параметры, определяющие вероятность прорыва теплоносителя: давление закачки пара, пластовое давление, трещиноватость массива, проницаемость пород и напряжённо-деформированное состояние приконтурной зоны.

В работе был предложен интегральный показатель опасности прорыва пара в горные выработки K_b, позволяющий ранжировать участки полевых треков нефтешахт по уровню опасности и выбирать наиболее подходящий способ локализации паропроявлений.

Ключевые слова: термошахтная добыча нефти, высоковязкая нефть, прорыв пара, микроклимат, профессиональный риск, математическое моделирование, нефтешахта, Ярегское месторождение.

Abstract: This article presents a mathematical model for predicting steam breakthrough into the mine workings of oil-mining operations, accounting for a complex set of geological, hydrodynamic, and technological factors. Based on an analysis of the conditions for thermal mining at the Yarega oil-titanium deposit, the key parameters determining the likelihood of a heat-carrier breakthrough have been identified: steam injection pressure, reservoir pressure, rock mass fracturing, formation permeability, and the stress-strain state of the zone surrounding the mine workings.

The study proposes an integral index for the risk of steam breakthrough into mine workings, denoted as K_b. This index enables the ranking of sections along the underground mine galleries according to their level of risk, facilitating the selection of the most appropriate method for containing steam-related incidents.

Keywords: thermal-shaft oil mining, high-viscosity oil, steam breakthrough, microclimate, occupational risk, mathematical modeling, oil mine, Yarega field.

Ярегское нефтетитановое месторождение является одним из объектов, где применяется термошахтный способ разработки высоковязкой нефти. Особенности геологического строения, трещиноватости массива и длительного теплового воздействия обусловливают пространственную неоднородность температурного режима горных выработок.

Анализ данных по паропроявлениям (рисунок 1) демонстрирует устойчивую тенденцию к росту точек выхода теплоносителя в полевые штреки нефтешахт, с 2012 по 20222 количество инцидентов возросло в 7 раз.



Рисунок 1 - Динамика паропроявлений в горные выработки при термошахтной технологии добычи нефти за период с 2012 по 2022 гг.

В результате паропроявлений происходит повышение температуры и влажности рудничного воздуха в полевых штреках, что приводит: к ухудшению условий труда (температура рудничного воздуха выше допустимого

значения в 36 ° С, указанного в приказе Ростехнадзора № 534), к возникновению несчастных случаев со смертельным исходом; сокращению эксплуатации подземного фонда (продувки); ограничению нагнетательного фонда; предписанию со стороны надзорных органов; остановке эксплуатации добычного блока.

Большинство исследований, посвящённых методам прогноза теплового режима посвящено угольным и рудным шахтам, не учитывают специфику термошахтной разработки месторождений. Вопросы формирования микроклимата при локальных прорывах пара, его миграции и количественной оценки пространственного распределения температур горного массива и воздуха исследованы в меньшей степени. В этой связи в работе предлагается математическая модель, которая позволяет оценить количественно риск возникновения прорывов пара в полевые штреки в условиях применения темрошахтной технологии.

Выявлены основные факторы, влияющие на количестве выходов теплоносителя в горные выработки: увеличение объемов разработки, высокая трещеноватость массива горных пород, заколонное скважинное пространство. Всё это способствует свободной миграции закачиваемого пара.

При проведении натурных наблюдений за состоянием горных выработок нефтешахт было выявлено, что в результате прогрева паром нефтенасыщенного пласта происходит выход теплоносителя в действующие горные выработки в зонах скрытой трещиноватости и нарушенности пласта.

В работе предложено условие возникновения прорыва пара, которое описывается критерием разрушения массива, отражающим баланс между движущим перепадом давления и сопротивлением пород:

$$\Delta P \geq \sigma_{\min} + R_t; \quad (1)$$

где $\Delta P = P_s - P_p$ перепад между давлением закачки пара *Ps* и пластовым давлением *Pp*;

$\sigma_{\min}$ — минимальное горное давление;

Rt — сопротивление массива раскрытию трещин.

Вероятность прорыва определяется функцией, которая учитывает соотношение движущей силы и сопротивления среды, а также плотность нарушений:

$$P_{br} = 1 - \exp\left(\frac{\Delta P \cdot k_f}{\sigma_{\min}}\right); \quad (2)$$

где $k_f = 1 + \beta D_f$ — коэффициент трещиноватости;

β — эмпирический коэффициент, отражающий ориентацию трещин относительно вектора фильтрации;

D_f — плотность трещин (количество трещин на единицу длины).

Зависимость имеет четкое физическое обоснование: вероятность прорыва увеличивается при росте давления закачки и плотности трещин, а также при снижении горного давления.

Для инженерных расчетов введен безразмерный критерий опасности прорыва:

$$K_b = \frac{k_f \cdot \Delta P}{\sigma_{\min}}; \quad (3)$$

Выбор технологии локализации паропроявлений осуществляется на основе ранжирования участков по величине критерия:

$K_b < 1$ — локальная изоляция (допустимый риск);

$K_b \approx 1$ — применение гелеобразующих составов;

$K_b > 1$ — применение геле-цементных систем (недопустимый риск).

Модель миграции теплоносителя после тампонирования трещиноватой зоны позволяет количественно оценить эффективность изоляционных мероприятий. Расход пара до проведения работ определяется законом Дарси:

$$Q = \frac{k_f \cdot k \cdot S}{\mu \cdot L} \cdot \Delta P; \quad (4)$$

где k — проницаемость массива;

S — площадь поперечного сечения канала фильтрации;

μ — динамическая вязкость пара;

L — длина пути фильтрации.

На участке уклонного блока 4Т-4 (пикеты 65–90 м) зафиксированы температура воздуха 37–43 °С и температура массива 55–60 °С, что соответствует зоне недопустимого риска. Расчетное значение $K_b > 1$ подтверждается фактическим наличием точки выхода пара на данном горизонте.

На основе предложенной модели разработана методология управления профессиональным риском, состоящая из семи последовательных этапов:

1. Выявление источников опасности (трещины, тектонические нарушения, старые скважины).
2. Расчет критерия K_b для прогнозирования зон паропроявлений с учетом давления закачки и фильтрационных свойств массива.
3. Оценка параметров микроклимата (расчет теплопритоков и зон превышения ПДК по температуре и влажности).
4. Расчет интегрального показателя профессионального риска — вероятности аварии P_{br}

$$R = P_{br} \cdot P_{\text{exp}} \cdot C \cdot K_m; \quad (5)$$

где P_{br} – вероятность прорыва;

P_{exp} — вероятность нахождения работника в опасной зоне,

C — тяжесть последствий,

Km — коэффициент микроклимата.

5. Ранжирование участков по категориям риска (допустимый, повышенный, высокий, недопустимый).

6. Выбор технологии локализации на основе расчетного K_b и требуемой степени изоляции.

7. Реализация защиты: нагнетание гелеобразующих или геле-цементных композиций, корректировка режимов закачки пара, оптимизация вентиляции и нормирование времени пребывания персонала.

Заключение

Разработана математическая модель прогнозирования прорыва пара, учитывающая геологические, гидродинамические и технологические факторы Ярегского месторождения. Предложенный критерий K_b позволяет количественно оценивать риски и обосновывать выбор изоляционных технологий.

Верификация модели на производственных данных Ярегских нефтешахт подтвердила её адекватность: расчётные зоны повышенного и недопустимого риска согласуются с фактическим распределением паропроявлений.

Модель обеспечивает научную основу для прогнозирования опасных микроклиматических условий, ранжирования участков по уровню профессионального риска и выбора рациональных технологий изоляции трещиноватого массива. Практическое применение модели позволяет перейти от реагирования на последствия аварийных ситуаций к их предупреждению, что соответствует приоритетным направлениям обеспечения безопасности труда при термошахтной добыче высоковязкой нефти.

Список литературы

1. Грунской Т.В. Изучение причин формирования нагревающего микроклимата в уклонных блоках Ярегских нефтешахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2023. – № 3. – С. 34–41.

2. Дядькин Ю.Д., Шахов С.И., Митенев В.Д. Исследование и регулирование теплового режима шахт северо-востока // Записки Горного института. – 1965. – Т. 50. – Вып. 1. – С. 49.

3. Воропаев А.Ф. Тепловое кондиционирование рудничного воздуха в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1979. – 192 с.

4. Черняк В.П. Тепловые расчёты подземных сооружений. – К., 1993.

5. Грунской Т.В., Фомин А.И. Исследование трещиноватости горных пород Ярегского месторождения для нормализации микроклимата с целью разработки составов для изоляции мест выхода пара // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 2(29). – С. 4–25.

6. Грунской Т.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях термошахтной добычи нефти // Рассохинские чтения : материалы междунар. конф. – Ухта : УГТУ, 2024. – С. 437–440.

7. Фомин А.И., Грунской Т.В. Комплексная оценка профессиональных рисков работников подземной группы при добыче нефти термошахтным способом // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 3. – С. 81–86.

8. Фомин А.И., Грунской Т.В. Разработка алгоритма управления профессиональным риском при добыче высоковязкой нефти термошахтным способом // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 6. – С. 78–85.