

УДК 622.243.063

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТЫХ СОЛЕЙ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ КОМПЛЕКСАМИ ССК В ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

А.Л. Неверов, В.П. Рожков, Л.С. Баталина, А.В. Минеев

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
E-mail: neveroff\_man@mail.ru

Статья посвящена изучению влияния простых солей на реологические свойства акриловых анионных и катионных полимеров с молекулярной массой от 5 до 22 млн ед. и плотностью заряда 20...46 %. Показано, что высаливающее действие можно оценивать по изменению реологических свойств на ротационном вискозиметре с большим набором частот вращения.

### Ключевые слова:

Анионный и катионный полиакриламид, реологические параметры, эффективная вязкость, высаливание.

### Key words:

Anionic and cationic polyacrylamide, rheological parameters, effective viscosity, salting out.

Сооружение скважин в сложных геологических условиях с применением комплексов ССК (снарядов со съемными керноприемниками) невозможно без применения современных буровых технологических жидкостей [1].

Различные формы неустойчивости ствола, возникающие в результате взаимодействия между буровым раствором и глинистыми формациями, обязательно связаны с явлениями гидратации. Возможны два механизма адсорбции воды на глинистых частицах: адсорбция мономолекулярных слоев воды на плоских поверхностях кристаллических решеток частиц (которая обычно называется кристаллическим набуханием или поверхностной гидратацией) и осмотическое набухание, происходящее вследствие высокой концентрации ионов, удерживаемых электростатическими силами вблизи поверхности глинистых частиц [2]. Лабораторные исследования показали, что одного защитного действия полимеров недостаточно для предотвращения набухания и для уменьшения отталкивающих сил между поверхностями глинистых частиц. В водной фазе должны присутствовать растворимые соли, добавление которых оказывает определенное влияние на реологические свойства растворов, от которых зависит в первую очередь интенсивность удаления бурового шлама. Неудовлетворительные реологические свойства могут привести к таким серьезным осложнениям, как образование пробок в стволе скважины, забивание шламом призабойной зоны, снижение механической скорости бурения, прихват бурильной колонны, размыв стенок скважины и столбиков керна, поглощение бурового раствора [2, 3].

Целью данной работы является исследование и оценка влияния солей на реологические свойства полимерных растворов для бурения скважин комплексами ССК в глинистых отложениях.

Реологическая кривая течения представляет собой фундаментальную характеристику механических свойств жидкости, соотносящуюся со структурными параметрами вещества, такими как молекулярная масса, плотность заряда, концентрация.

Таким образом, вискозиметрические измерения служат физическим методом оценки материала.

Анализ экспериментальных данных позволяет говорить о возможности или невозможности использования исследуемого материала в данных условиях. Из уравнений степенного ряда [3–5] наибольший практический интерес представляет уравнение Оствальда-Де Вале, называемое «идеальным степенным законом»:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации,  $s^{-1}$ ;  $K$  – показатель консистенции, Па·с;  $n$  – показатель нелинейности, безразмерная величина. В этом случае эффективная вязкость оказывается убывающей функцией скорости сдвига и представляется следующим образом:

$$\mu = K\dot{\gamma}^n,$$

где  $\mu$  – эффективная вязкость, мПа·с. Экспериментальные данные, представленные в работе [3], свидетельствуют, что зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига в «точке» представляет реальный физический факт, который может быть установлен безотносительно выбора метода измерения (или геометрии потока). Реологические кривые течения большинства буровых растворов занимают промежуточное положение между кривыми течения идеальной бингамовской вязкопластичной и идеальной псевдопластичной жидкостей. Обобщенный степенной закон позволяет распространить действие идеального степенного закона на течение разнообразных буровых растворов. Нелинейность графиков консистенции буровых растворов определяется с помощью ротационного вискозиметра с большим набором частот вращения (OFITE MODEL 900 VISCOMETER). Поэтому, по мнению Грея и Дарли [2], полезность реологических параметров PV и YP ограничена. Для прогнозирования характера течения при малых скоростях сдвига лучше рассчитывать эффективную вязкость при преобладающей в трубе и затрубном пространстве скорости сдвига.

Об относительных достоинствах различных используемых полимеров точных данных нет. Результаты лабораторных исследований различных экспериментаторов коррелировать очень трудно, так как методы испытаний не были идентичны, к тому же в опытах использовались разные глинистые сланцы. Молекулярная структура полимера, несомненно, является решающим фактором. Например, в ряде исследований на модели скважины Кларку [6] удалось успешно стабилизировать глинистые сланцы с помощью анионного полимера с плотностью заряда 30 %. При плотности заряда того же полимера 5 % результаты оказались весьма посредственными. Плохие результаты были получены также при использовании натрийполиакрилата. Объяснение, по-видимому, следует искать в том, что 30 % анионный заряд полимера является оптимальным, и в этом случае расстояние между функциональными группами вдоль цепочки молекулы полимера соответствует базовому расстоянию между пластинками кристаллов в глине [2].

Предварительные эксперименты по влиянию молекулярной массы и степени заряда на набухаемость монтмориллонитовых глин, проведенные авторами на приборе фирмы OFITE (США), показали, что акриловые полимеры с молекулярной массой 5–7 млн ед. и анионным зарядом 30 % лучше стабилизируют глину, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами, приведенными в работе Кларка [6]. С увеличением молекулярной массы вязкость полимерных растворов очень сильно возрастает. На основании многих исследований получена общая для многих полимеров зависимость вязкости от молекулярной массы (ММ). Это объясняется тем, что для перемещения всей макромолекулы необходимо кооперативное перемещение многих сегментов. Это значит, что сопротивление, оказываемое макромолекулой в потоке, должно зависеть от ее ММ. Поэтому в данной работе исследовались водорастворимые анионные и катионные полимеры (полиакриламиды) отечественных и зарубежных производителей с большой величиной ММ (5–22 млн ед.). Эффективность применения полимеров возрастает с увеличением ММ [5, 7]. В табл. 1 представлена характеристика полимеров, используемых в лабораторных исследованиях.

Исследования реологических свойств полимерных растворов проводились на ротационном вискозиметре фирмы OFITE MODEL 900 VISCOMETER, позволяющем рассчитывать реологические параметры обобщенного степенного закона в автоматическом режиме. Экспериментальные работы проводили по методике, изложенной в ISO 13503–1 (зарегистрировано Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии ФГУП «Стандартинформ», номер регистрации: 5364/ISO). Реологические параметры обобщенного степенного закона рассчитывались по 52 экспериментальным точкам.

Таблица 1. Характеристика полимеров

Торговая марка ММ, млн ед.	Плотность заряда, %	Фирма-производитель	Анионные полимеры
AN923MPM	7–9	20	SNF (Франция)
AN934	1–2	30	SNF (Франция)
AN934BPM	5–7	30	SNF (Франция)
AN934SH	14–16	30	SNF (Франция)
AN934VHM	17–22	30	SNF (Франция)
EZ-MUD-GOLD	1–2	30	BAROID
EZ-MUD-DP	15–17	30	BAROID
Праестол 2540	12–14	30	ЗАО «Москва-Штокхаузен», Пермь
Полифлок А1530	13–15	30	ОАО Полифлок (Ленинск-Кузнецк)
Полифлок А2020	17–20	20	ОАО Полифлок (Ленинск-Кузнецк)
Катионные полимеры			
Besfloc K6645	7–9	46	Kolon Life Science (Ю.Корея)
Besfloc K6634	7–9	30	Kolon Life Science (Ю.Корея)
Besfloc K6641	7–9	30	Kolon Life Science (Ю.Корея)
Besfloc K6735	8–10	46	Kolon Life Science (Ю.Корея)
Besfloc K6841	10–12	46	Kolon Life Science (Ю.Корея)

Обобщенный степенной закон позволяет распространить действие идеального степенного закона на течение разнообразных буровых растворов [2, 4]. Нелинейность графиков их консистенции в логарифмическом масштабе свидетельствует о том, что  $n$  и  $K$  меняются со скоростью сдвига, хотя идеальный степенной закон требует их постоянства. Для жидкости с поведением, описываемым степенным законом, скорость сдвига у поверхности измерения зависит от геометрии вискозиметра и коэффициента поведения потока. Скорость сдвига можно аппроксимировать с помощью ньютоновского поведения, такая скорость сдвига известна, как номинальная ньютоновская скорость сдвига. Определенный с помощью напряжения сдвига и номинальной скорости сдвига вискозиметра коэффициент консистенции обозначают  $K_c$ . Аналогично коэффициенты консистенции обозначают  $K_p$  и  $K_s$ , соответственно, когда описываемая степенным законом модель выражается в пересчете на номинальную скорость сдвига в трубе или щели (например, в трещине). Номинальная скорость сдвига и зависимый от геометрии коэффициент консистенции можно преобразовать, соответственно, в фактическую скорость сдвига у поверхности измерения и независимый от геометрии коэффициент консистенции  $K$ , используя коэффициент поведения потока.

Эффективную вязкость ( $\mu$ ) для вискозиметра рассчитывают с помощью выражения удельной номинальной скорости сдвига с соответствующим зависимым от геометрии коэффициентом консистенции. Значения эффективной вязкости будут отличаться для разных конфигураций. Хотя эффективная вязкость отличается для разных геометрий, рассчитываются согласующиеся значения напряжения сдвига с помощью номинальной скорости сдвига с соответствующим зависимым от геометрии коэф-

фициентом консистенции. Поэтому степенной закон, выраженный в пересчете на зависимый или независимый от геометрии коэффициент консистенции, даст правильное значение напряжения сдвига и, следовательно, потерю давления для выбранной конфигурации. Использованный в данном подразделе при расчетах подход основан на применении номинальной скорости сдвига в вискозиметре для сокращения данных, с последующим преобразованием коэффициента консистенции жидкости  $K_v$  в независимый от геометрии коэффициент  $K$ . Ниже представлены формулы преобразования независимого от геометрии коэффициента  $K$  в зависимые от геометрии коэффициенты консистенции  $K_p$  и  $K_s$  для потоков через трубу или щель, соответственно. Независимый от геометрии коэффициент консистенции рассчитывают по формуле:

$$K = K_v \left( \frac{1 - (R_1 / R_0)^2}{n \cdot (1 - (R_1 / R_0)^{2n})} \right)^{-n}$$

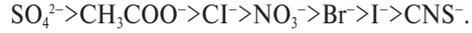
где  $R_1$  – радиус внутреннего неподвижного цилиндра, м;  $R_0$  – внутренний радиус наружного вращающегося цилиндра, м. Коэффициент консистенции  $K_s$  для щели (например, трещины) можно рассчитать как

$$K_s = K \cdot \left(2n + \frac{1}{3}n\right)^n,$$

а для трубы

$$K_p = K \cdot \left(3n + \frac{1}{4}n\right)^n.$$

В табл. 2 представлены экспериментальные результаты, отражающие действие простых солей на реологические свойства анионных и катионных полимеров. Анализ полученных данных показывает, что во всех без исключения экспериментах отмечается значительное снижение реологических параметров. Например, при добавлении к 1 % раствору, приготовленному из анионного полимера AN934VHM, хлористого калия (15 %) реологические параметры снижаются до значений 0,1 масс. % того же полимера [8]. Снижение реологических параметров объясняется высаливанием, которое происходит вследствие нарушения сольватной связи между макромолекулами полимера и растворителем – водой, т. е. вследствие дегидратации частиц, и связыванием молекул воды в гидратные оболочки ионов электролитов. Причем высаливающее действие на коллоидные системы оказывают все ионы, независимо от знака их заряда, а также от знака заряда поверхности ассоциатов высокомолекулярного соединения. Чем больше ион способен связывать молекулы растворителя, тем меньше растворителя остается полимеру, тем больше его высаливающее действие. А это, в свою очередь, зависит главным образом от энергии гидратации. Высаливающую способность в большей степени проявляют анионы, причем анионы по силе высаливающего действия можно представить в лиотропный ряд [9]



Согласно данным, представленными в табл. 2, наиболее ярко выражен эффект высаливания при добавлении сульфата калия, что полностью согласуется с вышеизложенным.

Эффект высаливания наглядно представлен на рисунке, где показано, как вязкостно-скоростные кривые высокомолекулярных полиакриламидов без добавок солей значительно отличаются при добавлении соли.

Необходимо отметить, что в области скоростей и напряжений сдвига, в которой полимеры ведут себя как неньютоновские жидкости, зависимость вязкости от молекулярной массы ослабевает при добавлении солей и увеличении интенсивности их деформирования. На кривых течения эта область наиболее ярко выражена при деформации, возникающей при скорости сдвига 170...1022 с<sup>-1</sup>.

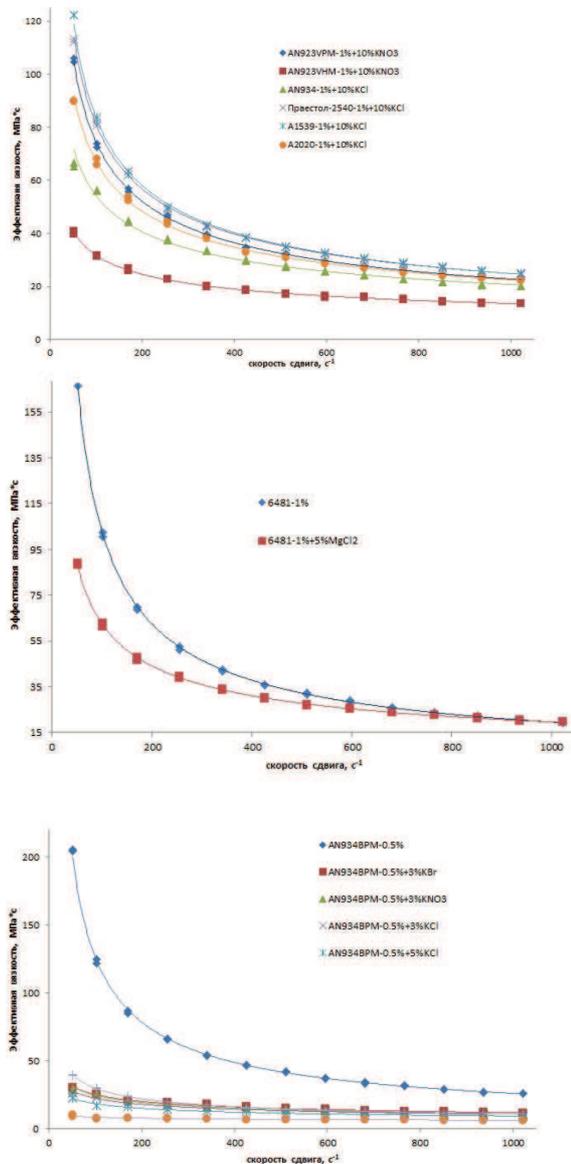


Рисунок. Зависимость эффективной вязкости водных растворов акриловых полимеров от скорости сдвига

Таблица 2. Зависимость реологических параметров водных растворов полимера акрилового ряда

Торговая марка полимера	Молекулярная масса, млн ед.	Заряд и его величина	Концентрация полимера, %	Концентрация соли, % (тип)	Реологические параметры обобщенного степенного закона					Коэффициент корреляции, R <sup>2</sup>
					n	K <sub>n</sub> , Па·с	K, Па·с	K <sub>s</sub> , Па·с	K <sub>p</sub> , Па·с	
AN923MPM	7-9	20	0,5	–	0,334	1,993	1,912	2,266	2,188	0,999
AN923MPM	7-9	20	1,0	10 (KNO <sub>3</sub> )	0,486	0,791	0,765	0,886	0,858	0,999
AN934	1-2	30	0,5	–	0,365	1,508	1,449	1,712	1,653	0,999
AN934	1-2	30	0,5	3 (KCl)	0,621	0,146	0,142	0,159	0,155	0,998
AN934	1-2	30	1,0	5 (KCl)	0,533	0,582	0,565	0,648	0,628	0,999
AN934	1-2	30	1,0	10 (KCl)	0,582	0,371	0,361	0,410	0,398	0,996
AN934BPM	5-7	30	0,5	–	0,315	2,959	2,835	3,366	3,250	0,997
AN934BPM	5-7	30	0,5	5 (KCl)	0,706	0,071	0,070	0,077	0,075	0,997
AN934BPM	5-7	30	0,5	3 (KNO <sub>3</sub> )	0,652	0,122	0,120	0,133	0,130	0,998
AN934BPM	5-7	30	0,5	3 (KBr)	0,675	0,113	0,111	0,122	0,120	0,998
AN934BPM	5-7	30	0,5	3 (KCl)	0,678	0,099	0,097	0,108	0,105	0,997
AN934BPM	5-7	30	0,5	1 (CHONa)	0,602	0,203	0,198	0,223	0,217	0,999
AN934BPM	5-7	30	1,0	0,5 (CaCl <sub>2</sub> )	0,886	0,026	0,026	0,027	0,026	0,999
AN934BPM	5-7	30	0,5	3 (CaCl <sub>2</sub> )	0,867	0,016	0,016	0,016	0,016	0,997
AN934BPM	5-7	30	1,0	15 (KCl)	0,581	0,378	0,368	0,417	0,405	0,997
AN934SH	14-16	30	0,5	–	0,280	3,619	3,460	4,115	3,976	0,994
AN934SH	14-16	30	0,5	3 (KCl)	0,626	0,146	0,143	0,160	0,156	0,997
AN934VHM	17-22	30	0,5	–	0,281	3,995	3,820	4,543	4,390	0,996
AN934VHM	17-22	30	0,5	0,5 (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0,555	0,274	0,267	0,304	0,295	0,998
AN934VHM	17-22	30	0,5	10 (KNO <sub>3</sub> )	0,565	0,221	0,215	0,245	0,238	0,996
AN934VHM	17-22	30	1,0	15 (KCl)	0,474	0,969	0,938	1,088	1,053	0,998
EZMUD-DP	15-17	30	0,5	–	0,296	2,951	2,824	3,357	3,242	0,997
EZMUD-DP	15-17	30	0,5	10 (KNO <sub>3</sub> )	0,567	0,229	0,223	0,253	0,246	0,999
EZMUD-G	1-2	30	0,5	–	0,432	1,376	1,327	1,553	1,501	0,997
EZMUD-G	1-2	30	1,0	10 (KBr)	0,726	0,149	0,147	0,160	0,157	0,996
PRAESTOL 2540	12-14	30	0,5	–	0,324	2,608	2,499	2,966	2,864	0,999
PRAESTOL 2540	12-14	30	1,0	10 (KCl)	0,487	0,859	0,832	0,962	0,932	0,999
A1530	13-15	30	0,3	–	0,349	1,384	1,328	1,573	1,518	0,997
A1530	13-15	30	1,0	10 (KCl)	0,473	0,948	0,832	0,963	0,932	0,998
A2020	17-20	20	0,5	–	0,253	3,536	3,376	4,015	3,882	0,997
A2020	17-20	20	1,0	10 (KCl)	0,525	0,597	0,579	0,665	0,644	0,999
K6645	7-9	46	0,5	–	0,288	2,660	2,544	3,025	2,922	0,995
K 6645	7-9	46	1,0	5 (Mix)*	0,554	0,406	0,394	0,450	0,436	0,998
K6634	7-9	30	0,5	–	0,297	2,406	2,303	2,737	2,644	0,996
K6634	7-9	30	1,0	5 (MgCl <sub>2</sub> )	0,531	0,492	0,478	0,548	0,531	0,998
K6641	7-9	30	0,5	–	0,314	2,036	1,951	2,316	2,237	0,996
K6641	7-9	30	1,0	10 (KCl)	0,608	0,232	0,226	0,255	0,248	0,998
K6735	8-10	46	0,5	–	0,286	2,712	2,594	3,084	2,980	0,996
K6735	8-10	46	0,3	1 (CHONa)	0,644	0,077	0,075	0,084	0,082	0,997
K6841	10-12	46	0,5	–	0,279	2,846	2,721	3,236	3,127	0,997
K6841	10-12	46	1,0	0,5 (CaCl <sub>2</sub> )	0,449	1,229	1,187	1,385	1,339	0,998
K6841	10-12	46	1,0	5 (MgCl <sub>2</sub> )	0,496	0,637	0,617	0,713	0,690	0,999

\* – смесь 5 % KCl+5 % MgCl<sub>2</sub>+5 % CaCl<sub>2</sub>.

### Выводы

Выполненные эксперименты показали, что добавление к полимерам простых солей радикально изменяет вязкостные свойства системы: снижается зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига. При этом эффективная вязкость в области

низких скоростей сдвига представляет собой предельную (при нулевой скорости сдвига) или наибольшую «ньютоновскую» вязкость. Далее с возрастанием скорости сдвига эффективная вязкость убывает, а при больших скоростях сдвига достигается предельное наименьшее значение эффектив-

ной вязкости, называемое наименьшей ньютоновской вязкостью. Снижение реологических параметров полимерных растворов при добавлении электролитов объясняется уменьшением способности воды растворять полимер ввиду связывания её молекул гидратирующимися ионами электролита. Поэтому необходимо использовать анионные полимеры с молекулярной массой 15–17 млн ед., концентрация в растворе не менее 0,5...1 масс. %. К производственным исследованиям можно реко-

мендовать полимеры следующих торговых марок: EZ-MUD-DP, Праестол 2540 и А1530 с добавками нитрата калия. Отметим, что применение полимерных растворов с простыми солями приводит к дополнительному расходованию дорогостоящих полимеров. Поэтому в последующих исследованиях авторы продолжают исследования по использованию полимерных растворов без добавок солей для бурения скважин комплексами ССК в глинистых отложениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин / под ред. Е.А. Козловского. – М.: Недра, 1984. – 437 с.
2. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей). – М.: Недра, 1985. – 509 с.
3. Маковей Н. Гидравлика бурения. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
4. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.
5. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. – М.: Химия, 1978. – 544 с.
6. Clark R.K. Polyacrylamide/Potassium-Chloride Mud for Drilling Water Sensitive Shales // Journal of Petroleum technology. – 1976. – № 28. – P. 719–727.
7. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. – 438 с.
8. Неверов А.Л., Гусев А.В., Рожков В.П., Минеев А.В. Реологические свойства растворов акриловых полимеров для бурения скважин комплексами ССК // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2012. – Т. 40. – № 1. – С. 86–96.
9. Савицкая М.Н., Холодова Ю. Д. Полиакриламид. – Киев: Техника, 1969. – 188 с.

Поступила 28.03.2013 г.

УДК 622.02

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПОВ ПРОХОДКИ ГОРНО-РАЗВЕДОЧНЫХ ВЫРАБОТОК, СООРУЖАЕМЫХ КАЖДЫМ ПРОХОДЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ, ПРИ ОДНО- И МНОГОЗАБОЙНОЙ РАБОТЕ

В.А. Шмурыгин, А.В. Панкратов, В.Г. Лукьянов

Томский политехнический университет  
E-mail: shvladsv@tpu.ru

*Рассмотрены вопросы эффективного использования дорогостоящего самоходного оборудования, темпов подвигания забоев основных выработок, схем организации производства работ при ведении горно-разведочных работ.*

#### Ключевые слова:

*Проходческие комплексы, горные работы, горные выработки, комплексы оборудования, эффективность, производственные процессы.*

#### Key words:

*Tunneling systems, mining operations, mining, equipment systems, efficiency, production.*

Необходимость проведения исследований в целях повышения проходческого оборудования за счет совершенствования ведения горных работ вызвана необходимым сокращением как в отрасли в целом, так и на остальных золоторудных месторождениях Северо-Востока страны, объемов производства подземных горнопроходческих работ (ГПР) из-за резкого удорожания последних. Между тем в общем комплексе работ при разведке сложных коренных месторождений цветных, редких и благородных металлов (и в частности, золота при детальной разведке) проходка подземных горных выработок является почти единственным

средством получения достоверной геологической информации.

В сложившейся ситуации одним из способов улучшения финансового положения геологоразведочной организации является совмещение разведки месторождения с попутной добычей минерального сырья (проходя основные вскрышные выработки эксплуатационным сечением). При этом на первый план выдвигается задача эффективного использования дорогостоящего самоходного оборудования как на протяжении всего предусмотренного проектом срока разведки месторождения, так и в течение каждой смены.